



TUGAS AKHIR – MO.141326

**ANALISA TEGANGAN SISA DAN DISTORSI MENGGUNAKAN
METODE ELEMEN HINGGA PADA STRUKTUR JACKET PT.
PERTAMINA HULU ENERGI WEST MADURA OFFSHORE PHE-24
DENGAN *SHELL ELEMENT***

FARRELL NAOFAL LAZAWARDY

NRP. 4312100108

Dosen Pembimbing :

Nur Syahroni, S.T., MT., Ph.D

Ir. Handyanu., M.T., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2017



FINAL PROJECT – MO.141326

***ANALYSIS OF RESIDUAL STRESS AND DISTORTION USING
FINITE ELEMENT METODE TO JACKET STRUCTURE PT.
PERTAMINA HULU ENERGI WEST MADURA OFFSHORE PHE-
24 WITH SHELL ELEMENT***

FARRELL NAOFAL LAZAWARDY

NRP. 4312100108

Supervisors :

Nur Syahroni, S.T., MT., Ph.D

Ir. Handayanu., M.T., Ph.D.

DEPARTMENT OF OCEAN ENGINEERING

Marine Technology Faculty

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2017

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISA TEGANGAN SISA DAN DISTORSI MENGGUNAKAN METODE ELEMENT HINGGA PADA STRUKTUR JACKET PT. PERTAMINA HULU ENERGI *WEST MADURA OFFSHORE PHE-24* DENGAN *SHELL ELEMENT*

TUGAS AKHIR

Dijukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada Program Studi S-1 Jurusan Teknik Kelautan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

Farrell Naofal Lazwardy

NRP. 4312 100 108

Disetujui oleh:

1. Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D. (Pembimbing 1)

2. Ir. Handayani, M.Sc., Ph.D. (Pembimbing 2)

3. Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc., Ph.D. (Penguji 1)

4. Ir. Imam Rochani, M.Sc. (Penguji 2)

SURABAYA, JULI 2017

(halaman sengaja dikosongkan)

**ANALISA TEGANGAN SISA DAN DISTORSI MENGGUNAKAN
METODE ELEMEN HINGGA PADA STRUKTUR JACKET PT.
PERTAMINA HULU ENERGI WEST MADURA OFFSHORE PHE-24
DENGAN SHELL ELEMEN**

Nama Mahasiswa : Farrell Naofal Lazawardy
NRP : 4312100108
Jurusan : Teknik Kelautan – FTK ITS
Dosen Pembimbing : Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D
Dr. Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D.

ABSTRAK

Seiring berkembangnya industri dan manufaktur di dunia penyambungan logam menggunakan las banyak digunakan khususnya industry minyak dan gas. Tegangan sisa dapat terjadi karena adanya perbedaan temperatur yang tinggi akibat pengelasan dan juga distribusi panas yang tidak merata. Ditambah laju pendinginan yang cepat mengakibatkan adanya perubahan mikro-struktur pada daerah lasan dan HAZ. Hal tersebut menyebabkan material menjadi keras tetapi rapuh (getas) sehingga dapat menyebabkan kegagalan struktur pada daerah sambungan tersebut. Dalam tugas akhir ini akan dilakukan simulasi pengelasan di salah satu sambungan tubular yang terdapat pada jacket PHE-24 untuk mengetahui tegangan sisa yang terjadi serta pengaruh Post Weld Heat Treatment terhadap tegangan sisa itu sendiri. Data WPS dan dimensi jacket yang berasal dari perusahaan PT. Gunanusa Utama fabrikator. Simulasi terbagi dalam 2 langkah yaitu analisa thermal dan struktural. Variasi yang digunakan dalam simulasi ini adalah suhu dan waktu saat Post Weld Heat Treatment. Nilai dari tegangan sisa maksimal 246.85 Mpa yang berada pada *pathline* 2 dan total deformasi pada ujung brace sebelah kiri adalah sebesar 6.694 mm. Kemudian dilakukan analisa Post Weld Heat Treatment yang mengacu pada AWS D1.1:2000 untuk mengurangi tegangan sisa yang terjadi. Dari hasil Post Weld Heat Treatment tersebut nilai dari tegangan sisa dapat diturunkan secara signifikan. Sebelum dilakukan PWHT nilai tegangan sisa maksimal yang didapat pada Path 1 (satu) 245.49 MPa dan Path 2 (dua) 246.85 Mpa. Setelah diberi perlakuan Post Weld Heat Treatment dengan variasi suhu sebesar 225C, 352C, dan 427C, pengurangan tegangan sisa maksimal terjadi sebesar 111.86 MPa dari tegangan sisa sebelum PWHT. Menjadi 134.99MPa pada PWHT 225C.

Kata Kunci : Sambungan *tubular*, multiplanar, tipe-K, tegangan sisa, distorsi, post weld heat treatment, *shell element*.

(halaman sengaja dikosongkan)

*ANALYSIS OF RESIDUAL STRESS AND DISTORTION USING FINITE
ELEMENT METODE TO JACKET STRUCTURE PT. PERTAMINA HULU
ENERGI WEST MADURA OFFSHORE PHE-24 WITH SHELL ELEMENT*

Name : Farrell Naofal Lazawardy
REG. : 4312100108
Department : Teknik Kelautan FTK-ITS
Supervisors : Nur Syahroni, S.T., MT., Ph.D
Ir. Handayanu., M.T., Ph.D.

ABSTRACT

Along with the development of industry and manufacturing in the world of metal welding using welding is widely used, especially oil and gas industry. Residual stress may occur due to high temperature differences due to welding and also uneven heat distribution. Coupled with rapid cooling rates resulted in micro-structure changes in the weld and HAZ areas. This causes the material to become hard but brittle that can cause structural failure in the area of the connection. In this final project welding simulation will be performed on one of the tubular connections found on the PHE-24 jacket to know the residual stress and the effect to Post Weld Heat Treatment on the residual stress itself. WPS data and jacket dimensions coming from PT. Gunanusa Utama Fabricator. The simulation is divided into 2 step: thermal and structural analysis. The variations used in this simulation are the temperature and time of the Post Weld Treatment. The value of the maximum residual stress of 246.85 MPa located on Path 2 and the total deformation at the left end of the brace is 6.694 mm. Then perform a Post Weld Heat Treatment analysis which refers to AWS D1 1:2000 to reduce residual stresses. From the result of Post Weld Heat Treatment the value of residual stress can be derived significantly. Prior to PWHT the maximum residual stress values obtained in path 1 (one) 245.49 MPa and path 2 (two) 246.85 MPa. After being treated with post weld heat treatment with temperature variations of 225 C 352 C, and 427 C, maximum residual stress reduction of 111.86 MPa of residual stresses before PWHT. Being 134.99 MPa on PWHT 225 C.

Keyword : *Tubular Joint, multiplanar, tipe-K, residual stress, distortion, post weld heat treatment, shell element.*

(halaman sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah rabbil'alaminm, puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang telah memberikan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini sesuai dengan waktu yang ditentukan. Tugas Akhir yang berjudul “Analisa Tegangan Sisa dan Distorsi Menggunakan Metode Elemen Hingga pada Struktur Jacket PT. Pertamina Hulu Energi *West Madura Offshore* Dengan *Shell Elemen*”PHE-24”.

Tugan Akhir ini merupakan salah satu syarat dalam menyelesaikan Studi Kesarjanaan (S-1) di Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Tugas Akhir ini membahas tentang analisa tegangan sisa dan distorsi dengan pengaruh Post Weld Heat Treatment.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dari laporan ini, baik dari material maupun teknik penyajiannya mengingat kurangnya pengetahuan dan pengalaman penulis. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan.

Dengan selesainya proses pengerjaan dan penulisan laporan Tugas Akhir ini, Penulis menyampaikan rasa syukur dan harapan sehingga laporan ini bermanfaat bagi masyarakat luas.

Surabaya, Juli 2017

Penulis

(halaman sengaja dikosongkan)

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini tentunya tidak lepas dari bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada :

1. Kedua Orang tua penulis yang secara tulus ikhlas memberikan doa dan panutan.
2. Bapak Nur Syahroni S.T.,M.T.,Ph.D selaku dosen pembimbing I yang telah memberikan ilmu dan pebimbingan dalam penyelesaian Tugas Akhir.
3. Bapak Ir. Handayanu., M.T., Ph.D. selaku dosen pembimbing II yang telah memberikan ilmu dan pebimbingan dalam penyelesaian Tugas Akhir.
4. Bapak Ir. Mas Murtedji., M.Eng. dan Bapak Herman Pratikno, ST., MT. selaku dosen wali selama masa perkuliahan di ITS – Surabaya
5. Bapak Ir. Imam Rochani., M.Sc. dan Bapak Yeyes Mulyadi ST., M.Sc. selaku dosen penguji selama proses siding proposal hingga siding akhir berlangsung.
6. Rekan – Rekan Tugas Akhir bimbingan Bapak Nur Syahroni S.T.,M.T.,Ph.D
7. Septian Fajar Utomo dan Baitul Obbi Bachri Wibisono yang membimbing penulis dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.
8. Rahmat Fitriansyah Ramadhan, Bayu Iman F., Farsyaodie, Rizal Eko Nugroho, dan Fahreza Sani Akbar yang telah menemani selama penulisan Tugas Akhir ini.
9. Rekan – rekan sejawat angkatan 2012 (Varuna) Teknik Kelautan ITS
10. Bapak Aiptu Eliyanto, Staf Kepolisian Polsek Sukolilo, karena telah membantu membuat surat kehilangan untuk urusan administrasi.

Ucapan terima kasih juga saya sampaikan kepada seluruh pihak yang secara langsung maupun tak langsung turut membantu dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

(halaman sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
KATA PENGANTAR.....	ix
UCAPAN TERMA KASIH	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL.....	xvii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan.....	3
1.4 Manfaat.....	3
1.5 Batasan Masalah	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	5
2.1 Tinjauan Pustaka.....	5
2.2 Dasar Teori	6
2.2.1 SMAW (Shielded Metal Arc Welding)	6
2.2.2 Siklus Thermal Las	8
2.2.3 Teori Rekristalisasi	11
2.2.4 Tegangan Sisa.....	12
2.2.5 Distorsi pada Pengelasan	14
2.2.6 Post Weld Heat Treatment.....	16
2.2.7 Metode Elemen Hingga	17
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	23
3.1 Metode Penelitian	23

3.2 Penjelasan Diagram Alir Penelitian	24
3.2.1 Studi Literatur	24
3.2.2 Pengumpulan Data	24
3.2.3 Pemodelan Geometri.....	24
3.2.4 Analisa Thermal.....	25
3.2.5 Analisa Struktural	28
3.2.6 Validasi Hasil	30
3.2.7 Pengaruh Post Heat Treatment (PWHT).....	30
3.2.8 Analisa Hasil dan Pembahasan	30
3.2.9 Kesimpulan	30
3.2.10 Penulisan Laporan.....	30
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	31
4.1 Pemodelan Struktur.....	31
4.2 Meshing.....	33
4.3 Perhitungan Beban Heat Flux	34
4.4 Penentuan Step dan Waktu Pengelasan.....	38
4.5 Hasil Analisa Thermal.....	40
4.5.1 Distribusi Panas.....	41
4.6 Distribusi Tegangan Sisa dan Distorsi yang Terjadi pada Sambungan Tubular	47
4.6.1 Distribusi Tegangan Sisa Pada Path 1.....	48
4.6.2 Distribusi Tegangan Sisa Pada Path 2.....	49
4.6.3 Analisa Total Deformasi	51
4.8 Pengaruh Post Weld Heat Treatment Pada Sambungan Tubular.....	51
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	55
5.1 Kesimpulan	55
5.2 Saran.....	55
DAFTAR PUSTAKA	57
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Model 3D Struktur Global PHE-24 Platform.....	2
Gambar 2.1 Cara kerja las listrik atau SMAW	6
Gambar 2.2 Sistem kerja busur las SMAW (Shielded Metal Arc Welding)	7
Gambar 2.3 Skema termal selama proses pengelasan.....	8
Gambar 2.4 Gambar distribusi panas secara konduksi pada saat pengelasan.....	10
Gambar 2.5 Ilustrasi Terbentuknya Tegangan Sisa	12
Gambar 2.6 Distribusi Tegangan Sisa pada Sambungan Las Tumpul.....	13
Gambar 2.7 Distribusi tegangan sisa pada las melingkar pada pipa	13
Gambar 2.8 Hubungan antara tegangan sisa dan distorsi	15
Gambar 2.9 Macam-macam distorsi dalam pengelasan.....	15
Gambar 2.10 Contoh Meshing pada Tubular Joint	18
Gambar 3.1 Diagram alir pengerjaan tugas akhir	23
Gambar 3.1 Diagram alir pengerjaan tugas akhir (lanjutan).....	24
Gambar 3.2 Diagram Alir Analisa Thermal.....	25
Gambar 3.2 Diagram Alir Analisa Thermal (lanjutan)	26
Gambar 3.3 Diagram Alir Analisa Struktural	28
Gambar 4.1 Dimensi Jacket dari Samping	31
Gambar 4.2 Dimensi Jacket dari Atas	32
Gambar 4.3 Model jacket PHE-24 menggunakan AutoCAD 2013	32
Gambar 4.4 Model joint tubular multiplanar tipe K	33
Gambar 4.5 Hasil meshing pada joint tubular dengan ANSYS workbench 16.2 .	34
Gambar 4.6 Daerah-daerah Pengelasan yang Ada pada Model	38
Gambar 4.7 Hasil analisa thermal pada joint tubular dengan ANSYS workbench 16.2.....	41
Gambar 4.8 Grafik Suhu Maksimum pada Daerah Pengelasan Atas	42
Gambar 4.9 Distribusi Panas yang Terjadi pada Daerah Pengelasan Atas	42
Gambar 4.10 Grafik Suhu Maksimum pada Daerah Pengelasan Bawah	43
Gambar 4.11 Distribusi Panas yang Terjadi pada Daerah Pengelasan Bawah	43

Gambar 4.12 Grafik Suhu Maksimum pada Daerah Pengelasan A1	44
Gambar 4.13 Distribusi Panas yang Terjadi pada Daerah Pengelasan A1	44
Gambar 4.14 Grafik Suhu Maksimum pada Daerah Pengelasan B1	45
Gambar 4.15 Distribusi Panas yang Terjadi pada Daerah Pengelasan B1	45
Gambar 4.16 Grafik Suhu Maksimum pada Daerah Pengelasan A2	46
Gambar 4.17 Distribusi Panas yang Terjadi pada Daerah Pengelasan A2	46
Gambar 4.18 Grafik Suhu Maksimum pada Daerah Pengelasan B2.....	47
Gambar 4.19 Distribusi Panas yang Terjadi pada Daerah Pengelasan B2	47
Gambar 4.20 Path pada Chord untuk pembacaan Tegangan sisa.....	48
Gambar 4.21 Path 1 Disesuaikan Dengan Titik Nol Grafik dari 1 ke 2	49
Gambar 4.22 Grafik Tegangan Sisa pada Path 1 (titik nol dari atas kebawah pada model).....	49
Gambar 4.23 Path 2 Disesuaikan Dengan Titik Nol Grafik dari 1 ke 2	50
Gambar 4.24 Grafik Tegangan Sisa pada Path 2 (titik nol dari atas kebawah pada model).....	50
Gambar 4.25 Total deformasi yang terjadi pada struktur	51
Gambar 4.26 Ilustrasi Alat Untuk Post Weld Heat Treatment (PWHT)	52
Gambar 4.27 Grafik Distribusi Perbandingan Tegangan Sisa Pada Path 1 Setelah PWHT (titik nol dari atas kebawah pada model)	53
Gambar 4.28 Grafik Distribusi Perbandingan Tegangan Sisa Pada Path 2 Setelah PWHT (titik nol dari atas kebawah pada model)	53

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Nilai koefisien efisiensi pengelasan	9
Tabel 4.1 Data dimensi tubular multiplanar tipe K.....	33
Tabel 4.2 Data panjang setiap area pengelasan.....	39
Tabel 4.3 Waktu satu pengelasan pada satu area pengelasan	39
Tabel 4.4 Step dan waktu untuk setiap pengelasan.....	40
Tabel 4.5 Variasi Suhu dan Waktu Tahan Post Weld Heat Treatment	52

(halaman sengaja dikosongkan)

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A

DATA-DATA YANG DIGUNAKAN DALAM Pengerjaan tugas akhir

LAMPIRAN B

PROSES pengerjaan analisa thermal dengan software
ANSYS WORKBENCH 16.2 (TRANSIENT THERMAL)

LAMPIRAN C

PROSES pengerjaan analisa structural dengan software
ANSYS WORKBENCH 16.2 (STATIC STRUKTURAL)

LAMPIRAN D

PROSES pengerjaan POST WELD HEAT TREATMENT (PWHT)
dengan software ANSYS WORKBENCH 16.2 (STATIC
STRUKTURAL)

(halaman sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. LATAR BELAKANG MASALAH

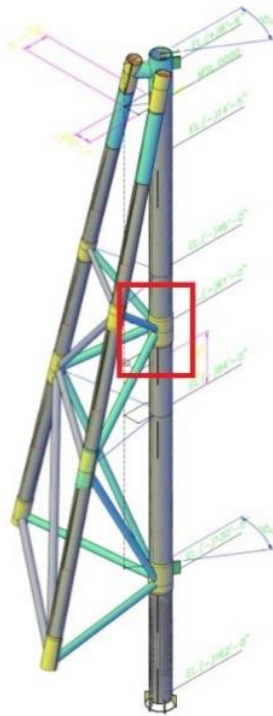
Seiring berkembangnya industri dan manufaktur di dunia penyambungan logam menggunakan las banyak digunakan khususnya industri minyak dan gas. Kebutuhan industri minyak dan gas akan terus meningkat karena belum ditemukannya energi alternative yang dapat menggantikan minyak dan gas. Proses pengambilan minyak dan gas bumi khususnya di laut lepas sangat bergantung pada kekuatan dari bangunan lepas pantai. Oleh karena itu penyambungan logam menggunakan las sering digunakan dalam industri minyak dan gas.

Penggunaan tubular member sering digunakan industri minyak dan gas karena bentuknya yang berongga dan sangat efektif. Untuk menggabungkan antara tubular member diperlukan pengaplikasian pengelasan. Menurut *American Welding Society* (AWS), proses pengelasan adalah bergabungnya dua bahan logam yang menghasilkan panduan bahan dengan cara memanaskannya hingga suhu cair bahan dan atau tanpa menggunakan tekanan maupun material filler (elektroda). Terdapat berbagai macam jenis proses pengelasan, seperti jenis pengelasan *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW), dimana jenis pengelasan SMAW ini sangat umum digunakan pada fabrikasi struktur lepas pantai.

Pada saat pengelasan, sumber panas berjalan terus dan menyebabkan perbedaan distribusi temperatur pada logam sehingga terjadi pemuaian dan penyusutan yang tidak merata antara bagian logam yang dilas dengan tidak dilas. Konsekuensinya adalah terjadinya peregangan di daerah lasan yang dapat menyebabkan terjadinya perubahan bentuk secara permanen atau distorsi. Regangan tersebut dapat menimbulkan tegangan yang sifatnya permanen, yang disebut tegangan sisa. Tegangan sisa tersebut dapat menimbulkan dampak lain yaitu terjadinya distorsi.

Adanya tegangan sisa dan distorsi tersebut sangat merugikan desai struktur karena dapat menimbulkan konsentrasi tegangan dan bentuk yang tidak sesuai dengan desain yang diharapkan. Oleh karena itu di perlukan studi lebih lanjut untuk

mengetahui besarnya tegangan sisa dan distorsi yang terjadi di struktur. Pada tugas akhir ini data diambil dari tugas akhir sebelumnya yang membahas tentang “Analisa Pengaruh *Post Weld Heat Treatment* Terhadap Tegangan Sisa dan Distorsi Pada Sambungan Tubular Multiplaner Tipe-K Dengan menggunakan *Finite Element Method*” yang di susun oleh Septian Fajar Utomo. Dalam tugas akhirnya, Septian Fajar Utomo meninjau pada satu sambungan yang ada pada PHE-24 seperti pada Gambar 1.1 yaitu multiplaner tipe-k dengan menggunakan *solid elemen*. Sedangkan pada tugas akhir ini akan meninjau struktur jacket secara global dengan menggunakan *shell elemen*.



Gambar 1.1 Model 3D Struktur Global PHE-24 Platform

1.2. PERUMUSAN MASALAH

Dari latar belakang masalah di atas, perumusan masalah yang akan diselesaikan dalam tugas akhir ini adalah:

1. Bagaimana distribusi tegangan sisa dan distorsi yang terjadi pada sambungan yang ada pada struktur jacket PHE-24 setelah proses pengelasan?

2. Bagaimana pengaruh *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) pada sambungan struktur jacket PHE-24?

1.3. TUJUAN

Adapun tujuan yang akan dicapai penulis dalam melakukan tugas akhir ini adalah:

1. Mendapatkan besarnya tegangan sisa dan distorsi yang terjadi pada sambungan struktur tubular berpenegar setelah proses pengelasan.
2. Menghitung pengaruh *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) pada sambungan struktur jacket PHE-24.

1.4. MANFAAT

Manfaat dari penelitian ini adalah dapat memberikan pengetahuan tentang pengaruh *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) pada pengelasan struktur jacket PHE-24 sehingga bisa dijadikan pertimbangan dan acuan dalam pengelasan yang tepat untuk meminimalkan distorsi dan tegangan sisa yang terjadi, sehingga dihasilkan pengelasan yang baik.

1.5. BATASAN MASALAH

Agar ruang lingkup tugas akhir ini tidak melebar maka perlu adanya batasan-batasan sebagai berikut:

1. Data Jacket menggunakan PHE-24 Platform dari PT. Gunanusa Utama Fabricator
2. Spesifikasi material yang digunakan adalah ASME BPV
3. Pengelasan dilakukan dengan metode las *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW)
4. Pre heating tidak dilakukan pada prosedur pengelasan
5. Proses modeling menggunakan bantuan software AutoCAD 2013
6. Proses running dan analisa menggunakan bantuan software ANSYS 16.2
7. Variasi pada *Post Weld Heat Treatment* (PWHT)

1.6. SISTEMATIKA PENULISAN

Sistematika yang digunakan dalam tugas akhir ini, antara lain:

BAB I PENDAHULUAN

Dalam bab ini, menjelaskan tentang hal apa saja yang melatarbelakangi sehingga studi ini dilakukan, permasalahan apa yang akan dibahas, tujuan yang ingin dicapai, manfaat yang diperoleh dari studi ini, batasan-batasan masalah yang diterapkan, dan sistematika penulisan yang digunakan dalam tugas akhir ini.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Selama proses pengerjaan dan penyelesaian tugas akhir ini, penulis menggunakan dasar-dasar teori, berbagai macam persamaan dan rumus, sehingga dalam bab ini akan dicantumkan hal-hal tersebut sebagai tinjauan pustaka.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini lebih menguraikan tentang tahapan-tahapan dan metode yang digunakan untuk mengerjakan tugas akhir ini.

BAB IV ANALISIS DAN HASIL PEMBAHASAN

Pada bab ini membahas bagaimana untuk menyelesaikan permasalahan yang diangkat dalam tugas akhir ini. Selain itu, validasi, analisis, pengolahan, dan pembahasan data hasil dari *output* perhitungan juga akan dibahas pada bab ini.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi kesimpulan dari tugas akhir, hasil dari analisis, pembahasan yang dilakukan serta saran-saran yang perlu diberikan untuk penelitian lebih. Bab ini juga untuk menjawab permasalahan yang telah di rumuskan pada Bab I.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. TINJAUAN PUSTAKA

Tegangan sisa dan distorsi merupakan fenomena yang umum terjadi sebagai dampak yang timbul setelah proses pengelasan terjadi. Analisa tentang tegangan sisa dan distorsi pada hasil pengelasan sangat dibutuhkan untuk menunjang keperluan desain struktur utama. Karena tegangan sisa yang di anggap tinggi dan distorsi yang tidak dapat di minimalisir dapat menimbulkan kerugian desain struktur seperti menimbulkan konsentrasi tegangan dan bentuk yang tidak sesuai dengan desain yang sesungguhnya.

Salah satu studi eksperimen yang dilakukan oleh Guangming Fu dkk (2014) meneliti tentang efek dari syarat batas (boundary conditions) terhadap tegangan sisa dan distorsi pada sambungan plat dengan tipe T. Dari hasil eksperimen ini menunjukkan bahwa tegangan sisa transversal, vertical displacement, dan angular distortion sangat dipengaruhi oleh syarat batas mekanik sedangkan tegangan sisa secara memanjang (longitudinal residual stress) tidak berubah secara signifikan terhadap syarat batas mekanik. Distorsi yang disebabkan oleh pengelasan tidak hanya mempengaruhi penampilan struktur tetapi juga menurunkan kinerja karena hilangnya integritas struktural dan akurasi dimensi (Gannon et al. 2012). Oleh karena itu penting untuk memprediksi distorsi yang disebabkan oleh pengelasan pada tahap desain kapal dan struktur lepas pantai untuk tujuan mengendalikan distorsi seperti dalam produksi dan meminimalkan biaya produksi (Conrardy, et al. 2006). Gannon et al. (2012) mempelajari pengaruh urutan pengelasan pada distribusi tegangan sisa dan distorsi datar bar kaku piring berdasarkan simulasi FEM.

Beberapa penelitian mengenai pengurangan tegangan sisa dengan cara *post-weld* juga dilakukan. Penelitian telah dilakukan Telmo Viana Rodrigues (2010) mengenai perbandingan tegangan sisa sebelum dan setelah dilakukan PWHT pada plat X65 spesifikasi material API 5L dengan variasi temperatur PWHT. Pada penelitian ini menunjukkan bahwa level suhu yang digunakan pada PWHT akan

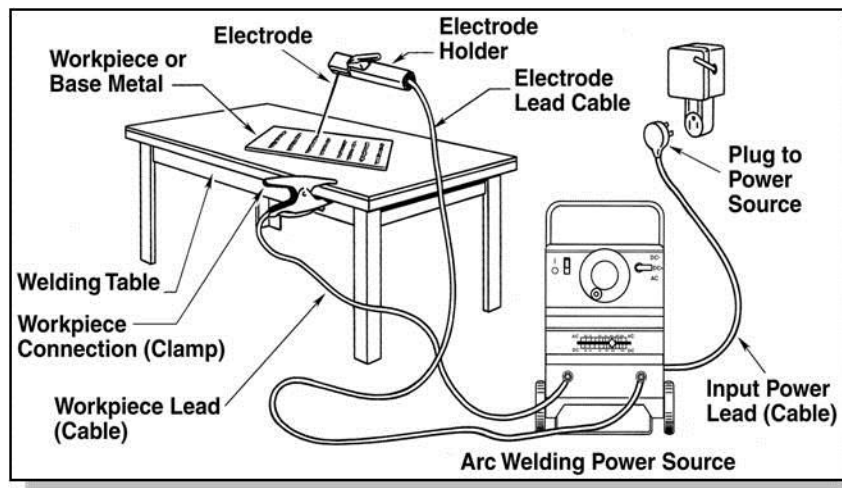
mempengaruhi nilai dari tegangan sisa. *Stress relieving* terjadi pada temperatur lebih dari 300⁰ C dan nilai ini akan meningkat sampai temperatur 600⁰C dimana terjadi stabilisasi.

Dari tugas akhir Baitul Obbi Bachri Wibisono (2017) mengenai tegangan sisa pada plat dengan membandingkan shell elemen dan solid elemen. Untuk sambungan tubular Septian Fajar Utomo (2017) juga telah melakukan penelitian mengenai pengaruh PWHT terhadap tegangan sisa dan distorsi pada sambungan tubular multiplanar tipe K, namun hanya ditinjau untuk satu sambungan saja. Dalam tugas akhir kali ini akan menganalisa tegangan sisa dan distorsi pada struktur jacket dengan shell element.

2.2. DASAR TEORI

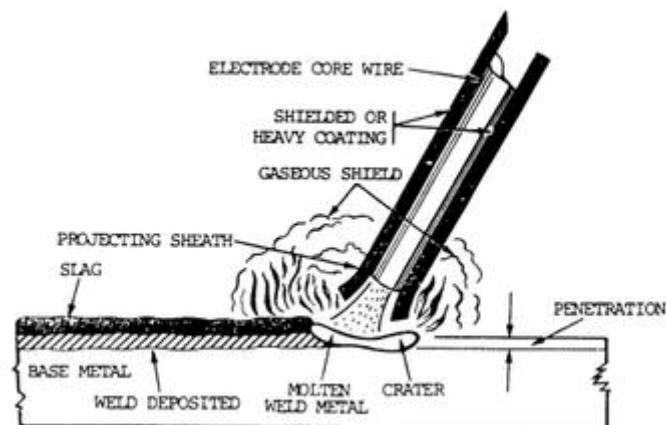
2.2.1 SMAW (*SHIELDED METAL ARC WELDING*)

Pengelasan SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) atau yang biasa disebut sebagai las listrik adalah proses pengelasan yang menggunakan panas untuk mencairkan material dasar dan elektroda. Panas tersebut ditimbulkan oleh lonjakan ion listrik yang terjadi antara katoda dan anoda dengan kata lain teknik pengelasan ini memanfaatkan panas busur listrik yang timbul karena perbedaan tegangan antara elektroda terbungkus dengan material. Panas yang timbul dari lonjakan ion listrik ini besarnya dapat mencapai 4000° sampai 4500° Celcius. Sumber tegangan yang digunakan ada dua macam yaitu listrik AC (Arus bolak balik) dan listrik DC (Arus searah). Cara kerja dari pengelasan SMAW seperti pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Cara kerja las listrik atau SMAW

Prinsip kerja pengelasan busur elektroda terbungkus SMAW adalah pengelasan busur listrik terumpan yang menggunakan elektroda yang terbungkus fluks sebagai pembangkit busur dan sebagai bahan pengisi. Panas yang timbul diantara elektroda dan bahan induk mencairkan ujung elektroda (kawat) las dan bahan induk, sehingga membentuk kawah las yang cair, yang kemudian membeku dan membentuk lasan. Bungkus (Coating) elektroda yang berfungsi sebagai fluks akan terbakar pada waktu proses berlangsung, gas yang terjadi akan melindungi proses terhadap pengaruh udara luar (Oksidasi) yang sekaligus berfungsi memantapkan busur. Gas pelindung (Shielded Gas) timbul dari lapisan pembungkus elektroda atau fluks yang terurai (decomposition). Prinsip kerja dari busur las SMAW sesuai dengan Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Sistem kerja busur las SMAW (Shielded Metal Arc Welding)

Fluks yang mencair akan terapung dan kemudian membeku pada permukaan las berupa kerak (slag). karena massa jenisnya lebih kecil dari logam las maka fluks ini berada diatas logam las pada saat cair. Kemudian setelah membeku, fluks cair ini berubah menjadi kerak (slag) yang menutupi logam las. Pada pengelasan ini yang terpenting adalah memperhatikan bahan fluks dan jenis lad listrik yang digunakan.

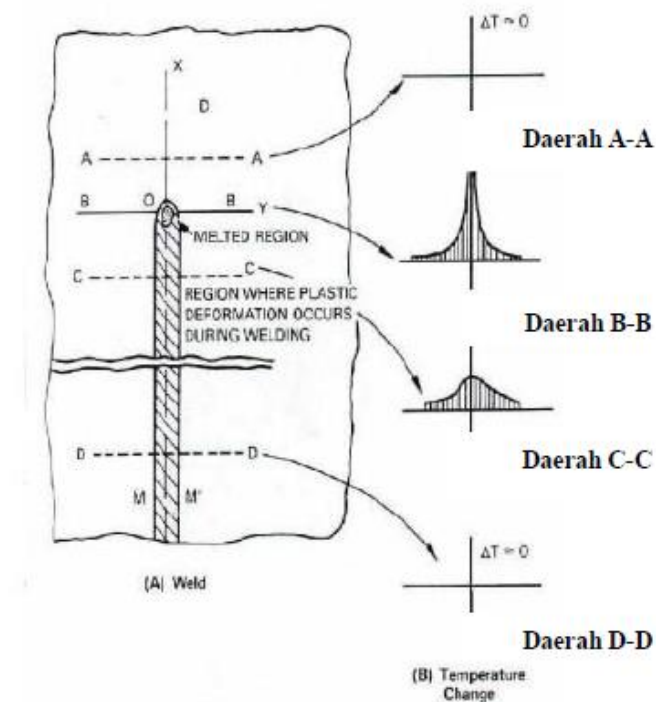
Pemilihan pengelasan *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) dikarenakan proses las busur paling sederhana dan paling serbaguna. Kerena sederhana dan mudah dalam mengangkut peralatan dan perlengkapan membuat proses SMAW ini mempunyai aplikasi luas mulai dari *refinery piping* hinga piplines, dan bahkan untuk pengelasan bawah laut guna memperbaiki struktur anjungan lepas pantai.

SMAW bisa dilakukan pada berbagai posisi atau lokasi yang bisa dijangkau dengan sebatang elektroda. Sambungan-sambungan pada daerah dimana pandangan mata terbatas masih bisa dilakukan dengan cara membengkokkan elektroda. SMAW digunakan untuk mengelas berbagai macam logam *ferrous* dan *non ferrous*, termasuk baja *carbon* dan baja paduan rendah, *stainless steel*, paduan-paduan nikel, *cast iron*, dan beberapa paduan tembaga.

2.2.2. SIKLUS THERMAL LAS

Pada proses pengelasan, daerah yang mengalami kontak langsung dengan busur las memiliki temperature yang lebih tinggi di bandingkan dengan daerah di dekatnya. Karena sifat konduksi logam, panas mulai mengalir ke sekitar daerah pengelasan yang mempunyai temperature lebih rendah sehingga terjadi distribusi panas ke daerah sekitar alur las .

Distribusi temperature yang terjadi pada saat proses pemanasan maupun pendinginan tidak merata pada seluruh material. Distribusi yang tidak merata ini terjadi baik dalam hal tempatnya pada material maupun bila ditinjau dari segi waktu terjadinya. Distribusi temperatur tersebut dapat didiskripsikan dengan membagi daerah lasan menjadi beberapa buah potongan melintang seperti pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Skema termal selama proses pengelasan. (Wirjosumarto, 1996)

- A-A = Daerah yang belum tersentuh panas dari busur las
- B-B = Daerah yang mencair tepat pada busur las
- C-C = Daerah terjadinya deformasi plastis selama proses pengelasan
- D-D = Daerah yang sudah mengalami pendinginan

Tidak semua energy panas yang terbentuk dari perubahan energy listrik diserap 100% oleh logam lasan, akan tetapi hanya sebagian besar saja. Sehingga energy busur las dapat di tulis sebagai berikut (Pilipenko, 2001)

$$Q = \eta \times V \times I \quad (2.1)$$

dengan

Q = Heat Input bersih (Watt)

η = Koefisien efisiensi pengelasan (-)

V = Tegangan busur (Volt)

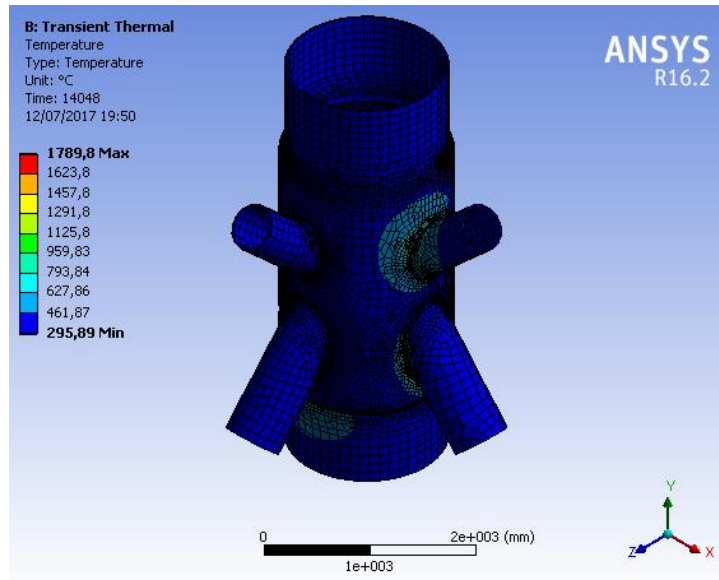
I = Arus listrik (A)

Nilai koefisiensi pengelasan akan berbeda untuk setiap jenis pengelasannya, seperti yang terlihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Nilai koefisien efisiensi pengelasan

Jenis Pengelasan	η
SAW-Steel	0,91 – 0,99
SMAW-Steel	0,66 – 0,85
GMAW – CO ₂ ; Steel	0,75 – 0,93
GMAW – Ar ; Steel	0,66 – 0,77
GTAW – Ar ; Steel	0,25 – 0,75
GTAW – He ; Al	0,50 – 0,80
GTAW – Ar ; Al	0,22 – 0,46

Distribusi panas yang terjadi selama proses pengelasan ialah distribusio panas secara konduktor dan konveksi. Distribusi panas secara konduksi pada saat pengelasan ialah dimana pada saat panas dari las mengenai logam secara merata seperti pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Gambar distribusi panas secara konduksi pada saat pengelasan

Sedangkan konveksi merupakan perpindahan panas disertai dengan perpindahan partikel, pada umumnya terjadi pada fluida (cairan dan gas). Pada proses pengelasan, distribusi panas secara konveksi terjadi dengan udara luar di sekitar proses pengelasan terjadi. Pada proses pengelasan terdapat istilah heat flux dimana merupakan laju perpindahan energy panad pada suatu permukaan per satuan waktu. Heat flux dapat mempengaruhi transferr panas pada distribusi temperatur saat pengelasan, dapat dihitung dengan persamaan.

$$q_1 = q_e \frac{A_1}{A_f} \quad (2.2)$$

Dimana:

- q_1 : Heat flux pada elemen (J/mm^2)
- q_e : Heat flux yang dihasilkan elektroda (J/mm^2)
- A_1 : Luas permukaan elemen (mm^2)
- A_f : Luasan fluks yang dihasilkan elektroda (mm^2)

Dengan luasan fluks yang dihasilkan elektroda dapat diperoleh dengan persamaan sebagai berikut:

$$A_f = b \cdot v \cdot t \quad (2.3)$$

Dimana:

b : Panjang kaki las(mm)

v : Kecepatan pengelasan (mm/s)

t : Waktu yang diperlukan pada satuan elemen (s)

Dengan diperoleh terlebih dahulu rumus q_e sebagai berikut:

$$q_e = \frac{Q}{A_e} \quad (2.4)$$

Dimana:

Q : Heat input bersih (Watt)

Ae : Luasan elektroda (mm^2)

2.2.3. TEORI REKRISTALISASI

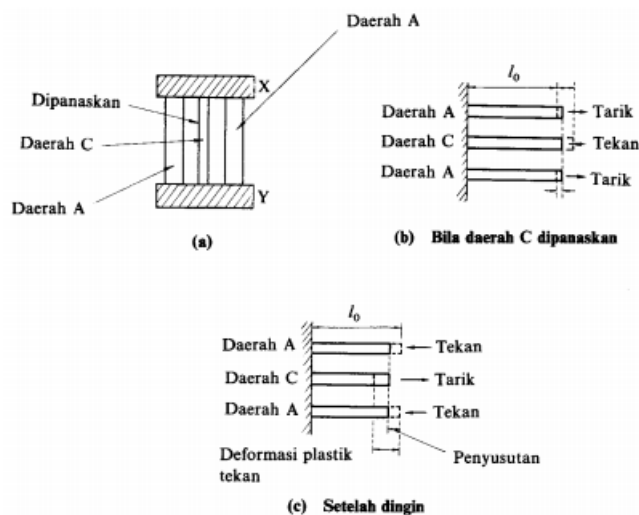
Rekristalisasi adalah perubahan struktur Kristal akibat pemanasan pada suhu kritis dimana untuk suhu kritis pada baja karbon adalah $723^{\circ}C$, sehingga dapat diartikan bahwa temperature rekristalisasi adalah suatu proses dimana butir logam yang terdeformasi digantikan oleh butiran baru yang tidak terdeformasi yang intinya tumbuh smpi butiran asli termasuk didalamnya. Pengerolan dingin adalah suatu proses pengerolan yang dilakukan dibawah temperature rekristalisasi. pengerolan ini dipergunakan untuk menghasilkan produk yang memiliki kualitas permukaan akhir yang baik. Pengerasan regangan yang diperoleh dari reduksi dingin dapat meningkatkan kekuatan. Material yang di proses dengan pengerolan pada suhu di bawah suhu rekristalisasi dikatakan telah mengalami pengerjaan dingin. Material pada umumnya mengalamin pengerjaan dingin pada temperature kamar, meskipun perlakuan tersebut mengakibatkan kenaikan suhu. Pengerolan dingin dapat mengakibatkan distorsi pada butir dan meningkatkan ketelitian dimensi serta menghaluskan permukaan logam. Sewaktu material mengalami 39 pengerolan dingin terjadi perubahan yang mencolok pada struktur butir seperti perpecahan butir dan pergeseran atom-atom.

2.2.4. TEGANGAN SISA (RESIDUAL STRESS)

Tegangan sisa adalah gaya elastis yang dapat mengubah jarak antara atom dalam bahan tanpa adanya beban dari luar. Tegangan sisa ditimbulkan karena adanya deformasi plastis yang tidak seragam dalam suatu bahan, yang disebabkan perlakuan panas yang tidak merata atau perbedaan laju pendinginan pada bahan yang mengalami proses pengelasan. Walaupun tegangan sisa secara visual tidak tampak, namun sebenarnya tegangan sisa tersebut juga bertindak sebagai beban yang tetap yang akan menambah nilai beban kerja yang diberikan dari luar.

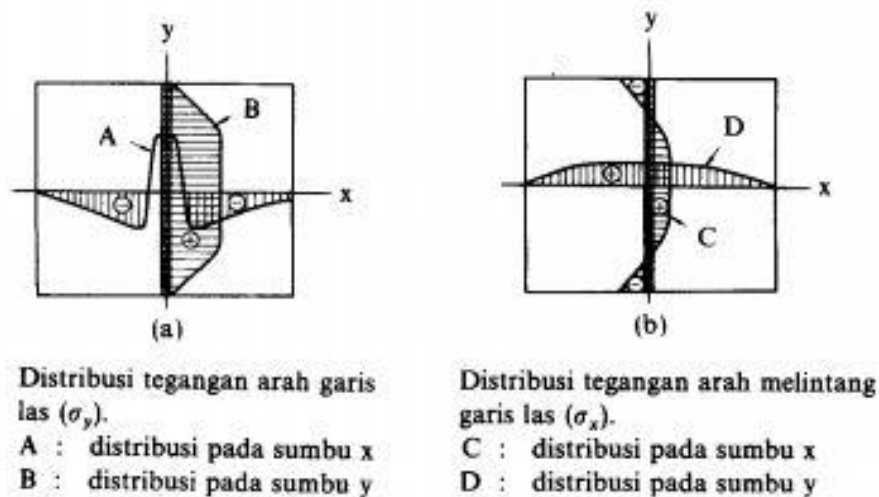
Tegangan sisa selalu muncul apabila sebuah material dikenai perubahan temperature yang tidak seragam, tegangan-tegangan ini di sebut tegangan panas. Untuk membahas masalah pengelasan, tegangan sisa yang akan ditinjau adalah tegangan sisa yang di timbulkan dari distribusi regangan non-elastik yang tidak merata pada material.

Terjadinya tegangan sisa di tunjukan pada Gambar 2.5. dibawah ini, dimana daerah C mengembang pada waktu pengelasan. Pengembangan pada daerah C ditahan oleh daerah A, sehingga pada daerah C terjadi tegangan tekan dan pada daerah A terjadi perubahan bentuk tetap (distorsi), sedangkan pada daerah A terjadi perubahan bentuk elastis. Ketika peroses pengelasan selesai, terjadi proses pendinginan dimana daerah C menyusut cukup besar karena disamping pendinginan juga karena tegangan tekan. Penyusutan ini ditahan oleh daerah A, oleh sebab itu daerah C akan terjadi Tarik yang diimbangi oleh tegangan tekan pada daerah A.

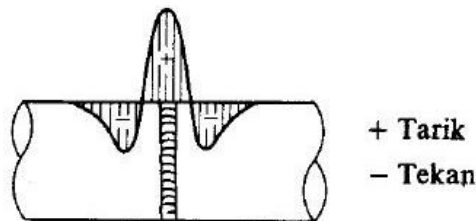


Gambar 2.5 Ilustrasi Terbentuknya Tegangan Sisa (Wiryosumarto, 1994)

Distribusi tegangan sisa bergantung pada jenis dan bentuk lasan. Pada alas tumpul, garis lasan arah memanjang (*longitudinal*) akan mencapai batas kekuatan luluh (*yield strength*) pada garis las dan kemudian menurun mencapai nol pada ujung plat. Sedangkan pada arah melintang (*transversal*), garis las terjadi keseimbangan antara tegangan tarik dan tegangan tekan yang ditunjukkan pada Gambar 2.6. dan distribusi tegangan sisa pada las melingkar ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.6 Distribusi Tegangan Sisa pada Sambungan Las Tumpul
 (Wiryosumarto, 1994)



Gambar 2.7 Distribusi tegangan sisa pada las melingkar pada pipa (Wiryosumarto, 1994)

Perhitungan tegangan sisa dilakukan dengan cara menggunakan hukum Hooke. Sedangkan besarnya regangan sisa dapat diukur dari perubahan ukuran antara batang sebelum dipotong, yaitu ukuran yang digambarkan pada bagian yang akan ditentukan tegangan sisanya dan ukuran sebenarnya yang didapat setelah bagian yang akan diuji dipotong. Dari hukum Hooke jelas bahwa perubahan ukuran ini disebabkan oleh adanya tegangan, karena itu besarnya tegangan dapat dihitung.

$$\sigma = E \frac{\Delta l}{l} \quad (2.5)$$

Dimana:

E : modulus elastisitas

σ : tegangan Sisa yang terjadi

Δl : perubahan panjang sebelum dan sesudah dipotong

l : panjang sebelum dipotong

Pada kasus terjadinya tegangan sisa dengan dua dimensi, menurut Wiryosumarto (1994) dapat dihitung menggunakan rumus berikut.

$$\sigma_x = \frac{E}{(1-\nu^2)} (\varepsilon_x + \nu \varepsilon_y) \quad (2.6)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{(1-\nu^2)} (\varepsilon_y + \nu \varepsilon_x) \quad (2.7)$$

Dimana:

σ_x : tegangan sisa tegak lurus garis las

σ_y : tegangan sisa searah garis las

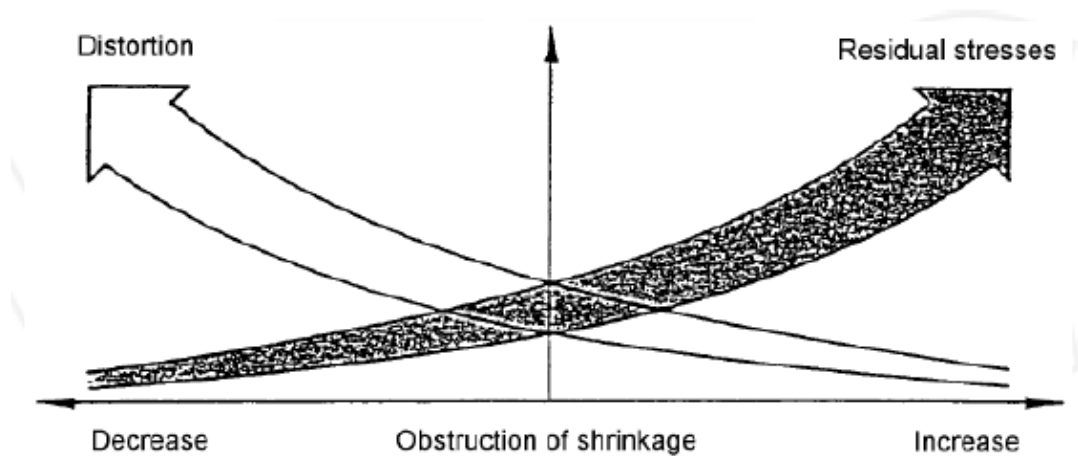
ν : *poisson ratio*

ε_x : regangan sisa tegak lurus garis las

ε_y : regangan sisa searah garis las

2.2.5. DISTORSI PADA PENGELASAN

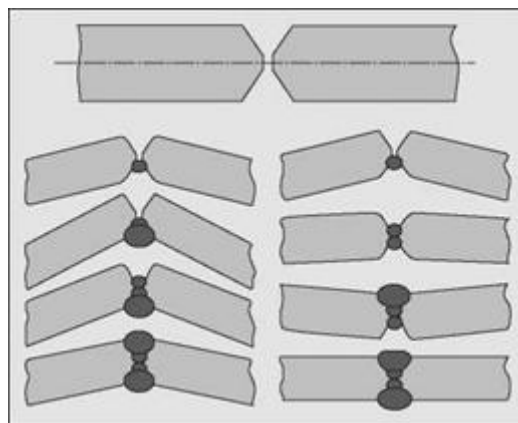
Setiap logam yang dipanaskan mengalami pemuaian dan ketika pendinginan akan mengalami penyusutan. Fenomena ini menyebabkan adanya ekspansi dan kontraksi pada logam yang dilas. Ekspansi dan kontraksi pada logam yang di las ini dinamakan distorsi, jadi distorsi terjadi karena adanya pemuaian dan penyusutan yang bebas akibat siklus termal las.



Gambar 2.8 Hubungan antara tegangan sisa dan distorsi (Syahroni dan Hidayat, 2012)

Distorsi dikategorikan menjadi tiga macam seperti pada Gambar 2.8, yaitu:

1. Distorsi longitudinal
2. Distorsi transfersal
3. Distorsi angular
4. Distorsi bending longitudinal
5. Distorsi buckling



Gambar 2.9 Macam-macam distorsi dalam pengelasan (<http://msd.com.ua>)

Ada tiga perubahan dimensi yang mendasar akibat proses pengelasan yang dapat dengan mudah memahami mekanisme distorsi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9 yaitu sebagai berikut.

1. Penyusutan transversal (transverse shrinkage) terjadi tegak lurus terhadap jalur las yang dapat mengakibatkan tarikan ke arah sumbu tegak jalur las.
2. Penyusutan longitudinal (longitudinal shrinkage) terjadi akibat adanya ekspansi dan kontraksi deposit logam las di sepanjang jalur las yang menyebabkan tarikan dan dorongan pada logam dasar yang dilas.
3. Distorsi rotasional atau biasa disebut dengan distorsi sudut, terjadi tegak lurus terhadap jalur las tetapi tarikan yang dihasilkan agak memutar, pada umumnya terjadi di pengelasan pada butt yang panjang

2.2.6. POST WELD HEAT TREATMENT (PWHT)

Post welding Heat Treatment merupakan proses perlakuan panas pada benda hasil pengelasan dengan tujuan untuk menghilangkan tegangan sisa yang terbentuk setelah proses penelasan selesai. Setelah pemanasan dan pendinginan akibat proses pengelasan, sifat material akan berubah karena adanya perubahan struktur mikro. Untuk mengembalikan kembali sifat material struktur maka dilakukan pemanasan pada suhu tertentu dan pada jangka waktu tertentu. Parameter suhu dan waktu ini tergantung dari jenis material dan ketebalan material.

Berdasarkan AWS D.1.1 Struktural Welding Code-Steel pada bab prequalification section 3.14 Postweld Heat Treatment, material yang dapat diberi perlakuan PWHT harus mempunyai syarat sebagai berikut:

1. Logam dasar yang akan diberi PWHT memiliki nilai specified minimum yield strength yang tidak melebihi 50 ksi (345 Mpa)
2. Logam dasar yang digunakan bukan hasil quenching & tempering, quenching & self tempering, thermomechanical control processing (contohnya seperti ASTM A 500 tubing)
3. Material tidak disyaratkan untuk mengalami impact test pada base metal, weld metal, dan HAZ
4. Adanya data pendukung bahwa material memiliki kekuatan dan keuletan yang cukup
5. Post weld heat treat dilakukan sesuai section 5.8

2.2.7. METODE ELEMEN HINGGA

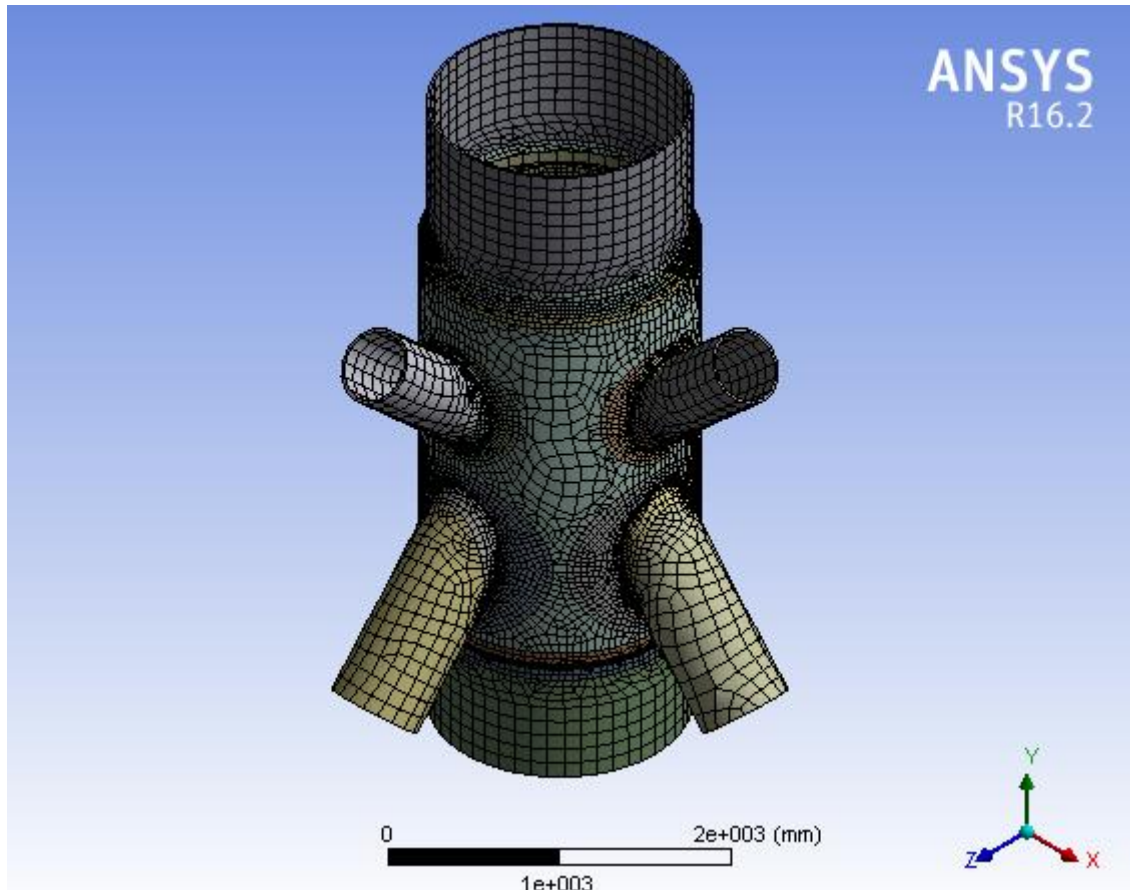
Metode elemen hingga ini dapat digunakan untuk menyelesaikan berbagai masalah. Struktur yang dianalisa dapat berbentuk sembarang, beban dan kondisi batas sembarang sesuai analisa yang dilakukan. Untuk memudahkan penerapan konsep metode elemen hingga dapat dilakukan pemodelan dengan software seperti ABAQUS, ANSYS, SAAP, dan CATIA.

Metode elemen hingga ini banyak digunakan karena hasil analisa sangat dekat atau hampir sama dengan struktur sebenarnya. Namun hasil dari metode elemen hingga ini bersifat numerik, bukan merupakan persamaan yang dapat diaplikasikan untuk berbagai kasus. Selain itu data-data yang dimasukkan cenderung banyak sehingga data output yang dijalankan oleh software pun lebih banyak. Secara umum tahapan dalam perumusan metode elemen hingga adalah sebagai berikut:

a) Pendiskritan dan Pemilihan Jenis Elemen

Pemilihan jenis elemen merupakan tahap yang sangat penting karena dapat menentukan keakuratan hasil analisis. Jenis elemen harus dipilih sesuai analisis agar dapat menghasilkan hasil analisis yang mendekati keadaan sebenarnya. Terdapat 2 (dua) jenis elemen yaitu solid elemen dan shell elemen dalam tugas akhir ini pemilihan elemen menggunakan shell elemen. Adapun manfaat dari pemilihan *Shell Element* adalah untuk mempercepat waktu dari analisa numerik dan untuk melakukan analisa dengan struktur yang lebih kompleks. Hasil analisis yang mendekati keadaan sebenarnya juga tergantung dari pendiskritan yang mana dalam pemodelan disebut dengan proses *meshing*. Ukuran yang dipilih ketika proses *meshing* harus mewakili keadaan struktur sebenarnya. Semakin kecil ukuran *meshing* akan membutuhkan kapasitas hardisk dan memori yang cukup besar. Hal ini karena input data *software* semakin banyak sehingga untuk proses akan lebih berat.

Meshing untuk ukuran elemen kecil biasanya digunakan untuk analisis dengan kondisi yang mengalami perubahan drastis. Sedangkan untuk *meshing* ukuran elemen besar digunakan untuk analisis yang perubahannya cenderung konstan. Ilustrasi tampak pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Contoh *Meshing* pada Tubular Joint

b) Pemilihan Fungsi Displasemen

Menentukan fungsi displasmen yang didefinisikan pada tiap elemen dengan menggunakan nilai parameter di tiap node elemen. Fungsi yang digunakan adalah fungsi polinomial, linear kuadratik, kubik, atau deret trigonometri.

$$\{w\} = [N]\{u\} \quad (2.8)$$

c) Definisi Hubungan Regangan-Displasmen dan Tegangan-Regangan

Dapat ditentukan hubungan regangan akibat displasmen yang sudah ditentukan pada tahap sebelumnya. Hubungan tegangan-regangan nanti akan digunakan dalam proses penurunan persamaan untuk masing-masing elemen.

$$\sigma = D \varepsilon^{el} \quad (2.9)$$

dan

$$\varepsilon = \varepsilon^{el} + \varepsilon^{th} \quad (2.10)$$

dimana:

ε : Regangan total

ε^{el} : Regangan elastis

ε^{th} : Regangan termal

D : Kekakuan material

Vector thermal strain untuk isotropik medium dengan suhu yang tergantung pada koefisien ekspansi termal, dengan rumus:

$$\varepsilon^{th} = \Delta T \alpha(T) \quad (2.11)$$

ΔT adalah perbedaan antara *reference temperature* dengan *actual temperature*.

d) Penentuan Matriks Kekakuan Elemen dan Persamaan Elemen

Untuk menentukan matriks kekakuan dan persamaan elemen dapat digunakan metode keseimbangan langsung dan metode energi dengan menggunakan prinsip energi potensial minimum.

$$\delta U = \delta P \quad (2.12)$$

dimana:

U : *internal strain energy (internal work)*

P : *external work*, seperti efek inersia

δ : *virtual operator*

Virtual strain energy dapat ditulis:

$$\delta = \int [\delta \varepsilon]^T \{\sigma\} d\{V\} \quad (2.13)$$

dimana:

ε : vektor regangan

σ : vektor tegangan

V : volumen elemen

Substitusi persamaan (3.17) dan (3.18) untuk memperoleh δU .

$$\delta U = \int (\{\delta \varepsilon\}^T [D] \{\varepsilon\} - \{\delta \varepsilon\}^T [D] \{\varepsilon^{th}\}) dV \quad (2.14)$$

Strain yang dikaitkan dengan nodal displasmen:

$$\{\varepsilon\} = [B] \{u\} \quad (2.15)$$

Untuk displasmen konstan, energi regangan *virtual* adalah:

$$\delta U = \{\delta \varepsilon\}^T \int [B]^T [D] [B] dV \{u\} - \{\delta u\}^T \int [B]^T [D] \{\varepsilon^{th}\} dV \quad (2.16)$$

External work karena gaya inersia diformulasikan sebagai:

$$\delta P = - \int \{\delta w\}^T \{F^a\} dV \quad (2.17)$$

dimana:

w : vektor displasmen dari general point

$\{F^a\}$: vektor *acceleration force*

Berdasarkan hukum gerak Newton II:

$$\{F^a\} = \rho \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} \{w\} \quad (2.18)$$

Jika displasmen dengan elemen dihubungkan pada nodal displasmen:

$$\{w\} = [N] \{u\} \quad (2.19)$$

Persamaan (3.25) dapat ditulis kembali menjadi:

$$\delta P = -\{\delta u\} \rho \int \{N\}^T [N] dV \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} \{u\} \quad (2.20)$$

Lalu substitusi persamaan (3.24) dengan persamaan (3.28) , menjadi:

$$\begin{aligned} & \{\delta \varepsilon\}^T \int [B]^T [D] [B] dV \{u\} - \{\delta u\}^T \int [B]^T [D] \{\varepsilon^{th}\} dV \\ & = -\{\delta u\} \rho \int \{N\}^T [N] dV \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} \{u\} \end{aligned} \quad (2.21)$$

$\{\delta u\}^T$ vektor adalah sebuah displasmen umum yang sebenarnya, sebuah kondisi diperlukan untuk memenuhi persamaan displasmen konstan dikurangi sampai:

$$[K_c] - \{F_c^{th}\} = [M_c]\{\ddot{u}\} \quad (2.22)$$

dimana:

$$[K_c] = \int [B]^T [D] [B] dV \rightarrow \text{Matriks kekakuan elemen} \quad (2.23)$$

$$\{F_c^{th}\} = \int [B]^T [D] [\epsilon^{th}] dV \rightarrow \text{Vektor beban termal elemen} \quad (2.24)$$

$$\{M_c\} = \rho \int [N]^T [N] dV \quad (2.25)$$

e) Penggabungan Persamaan Elemen dengan Penentuan Kondisi Batas

Pada tahap ini akan didapatkan matriks kekakuan global yang bersifat singular. Kondisi batas digunakan untuk menghilangkan singularitasnya. Matriks kekakuan global didapatkan dari menggabungkan persamaan elemen pada tahap empat menggunakan metode kekakuan langsung.

f) Penyelesaian Derajat Kebebasan yang Belum Diketahui

Mendapatkan hasil besaran yang diperlukan tetapi tidak didapat secara langsung dari tahap sebelumnya. Dapat dicari dengan metode eliminasi (misalkan metode *gauss*) dan iterasi (misalkan metode *gauss-siedel*).

g) Penentuan Regangan dan Tegangan Elemen

Perhitungan regangan dan tegangan yang terjadi pada elemen berdasarkan hasil dari tahap enam.

h) Penampilan Hasil

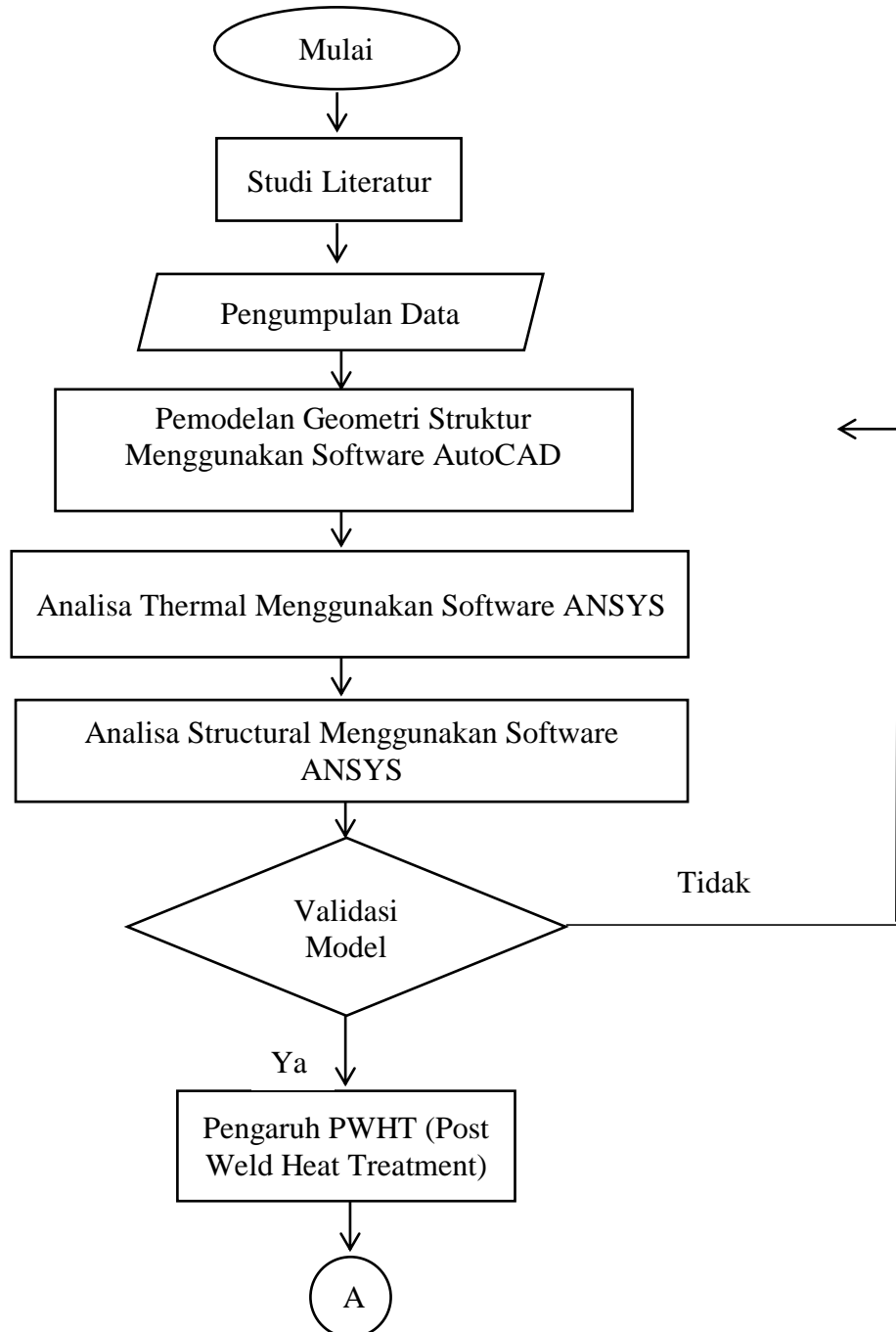
Hasil yang diperoleh ditampilkan dalam bentuk grafis sehingga akan mempermudah pembacaan hasil.

(halaman sengaja dikosongkan)

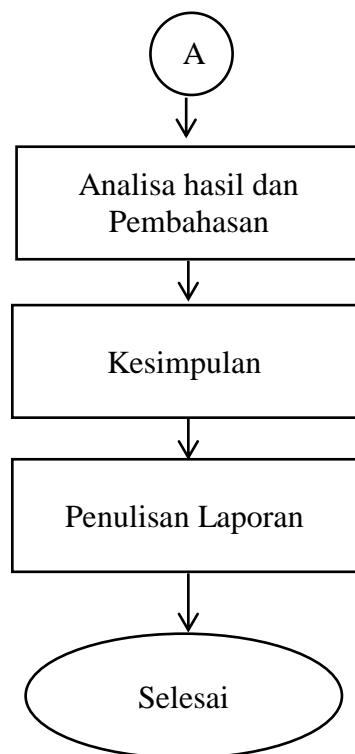
BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. METODE PENELITIAN

Untuk mempermudah proses pelaksanaan penelitian dalam Tugas Akhir ini, maka disusunlah alur penelitian seperti Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir pengerjaan tugas akhir



Gambar 3.1 Diagram alir pengerjaan tugas akhir (lanjutan)

3.2. PENJELASAN DIAGRAM ALIR PENELITIAN

3.2.1. STUDI LITELATUR JURNAL

Studi litelatur diperoleh dari jurnal internasional maupun local, materi dan diktat perkuliahan, serta mempelajari software yang mendukung penelitian ini.

3.2.2. PENGUMPULAN DATA

Data-data yang di gunakan dalam penelitian ini meliputi:

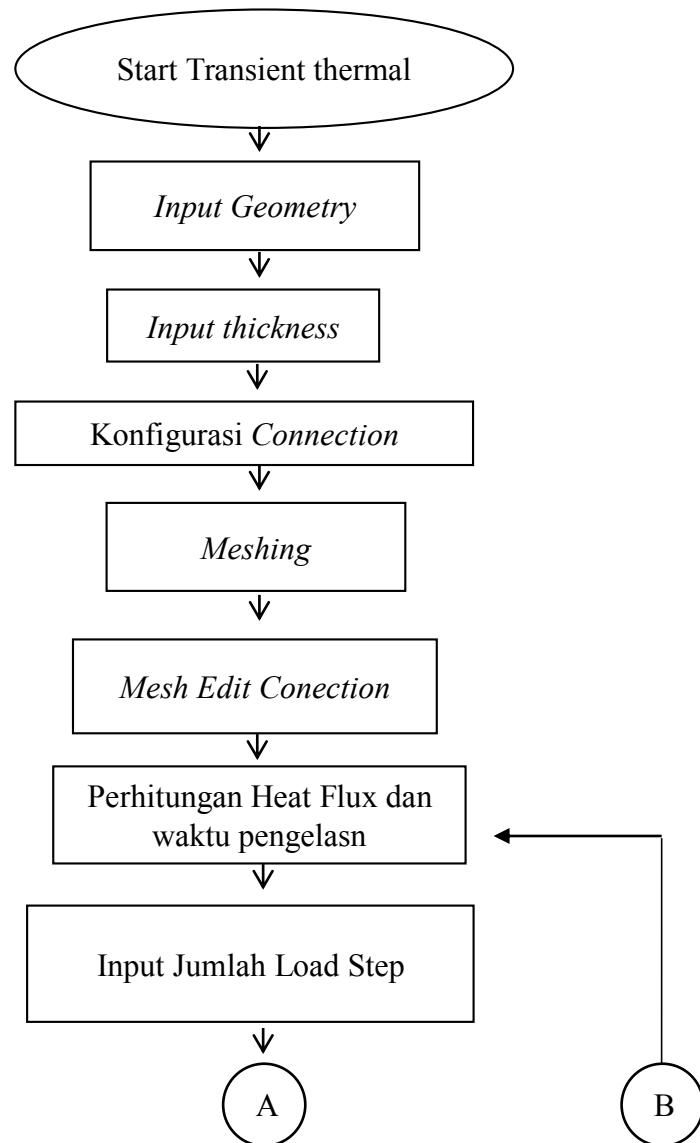
- Ukuran dan bentuk struktur
- Parameter pengelasan

3.2.3. PEMODDELAN GEOMETRI

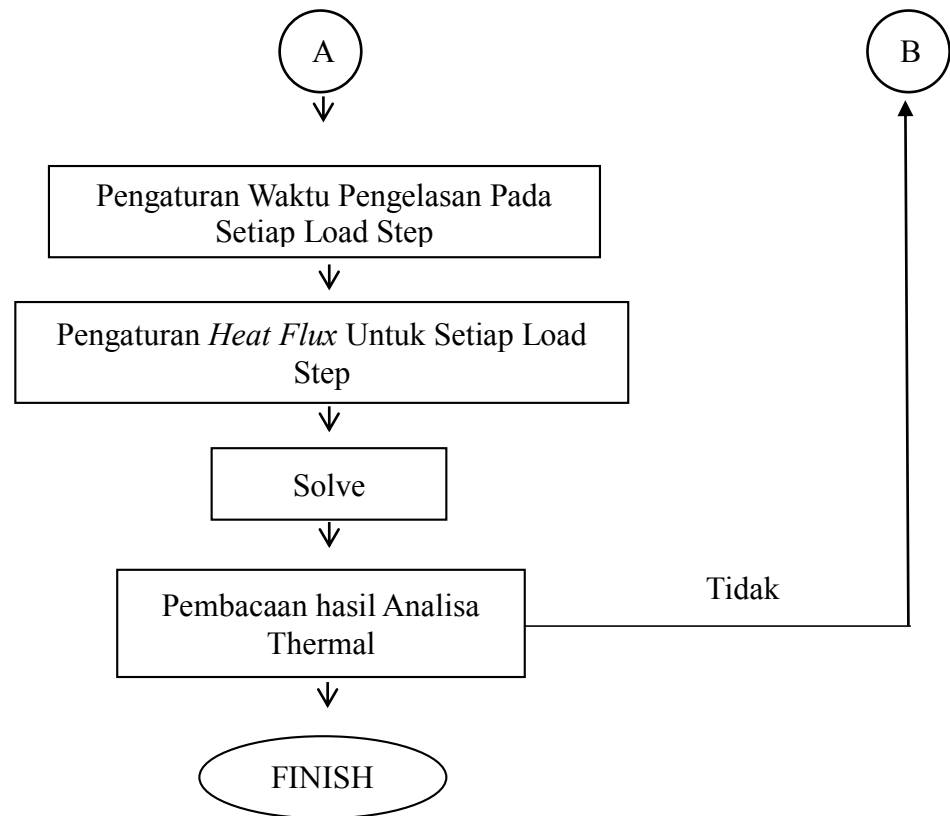
Pemodelan struktur jacket PHE-24 langsung menggunakan menggunakan software ANSYS karena menggunakan shell elemen.

3.2.4. ANALISA THERMAL

Pada analisis thermal dilakukan simulasi pengelasan dengan memberikan beban panad yang berupa heat flux ke area pengelasan. Pemberian beban panas dilakukan sesuai dengan urutan alur pengelasan SMAW. Proses analisa thermal dapat dilihat dalam diagram alir Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Diagram Alir Analisa Thermal



Gambar 3.2 Diagram Alir Analisa Thermal (lanjutan)

Penjelasan diagram alir analisa thermal adalah sebagai berikut:

- *Start Transient Thermal*
Sebelum memulai analisa harus dipilih jenis penyelesaian masalah yang akan digunakan pemodelan. Dalam pemodelan pengelasan, pada jendela utama dapat dipilih *Transient Thermal*, yang berarti dalam analisa ini dapat dilakukan pemberian beban panas dan waktu pada model.
- *Input Material Geometry*
Dalam tahap ini, geometri yang telah dimodelkan dalam AutoCAD harus diinput dalam Ansys. Dengan cara diexport dari AutoCAD dan diimport kedalam Ansys Geometry.
- *Input Thickness*
Model geometri yang sudah diinput kedalam Ansys Geometry bisa diakses melalui *Transient Thermal*. Pengaturan ketebalan material dan sifat material (*Material Properties*) dapat dilakukan sebelum ketahap berikutnya.

➤ *Meshing*

Pada tahap ini model yang telah diberikan ketebalan dan sifat material dibagi menjadi beberapa elemen. *Meshing* bertujuan untuk membagi keseluruhan model menjadi beberapa elemen sehingga Perhitungan dapat dilakukan terhadap titik-titik secara lebih teliti. *Meshing* dapat diatur sesuai dengan tingkat ketelitian yang diinginkan. Semakin banyak elemen meshing yang dibuat semakin teliti perhitungannya.

➤ *Mesh Edit Connection*

Sebelum Melakukan tahap berikutnya agar pada setiap bagian *Mesh* tersambung diperlukan pengaturan *Mesh Edit* agar setiap elemen tersambung dengan rapi.

➤ Perhitungan *Heat Flux* dan waktu pengelasan

Pada tahap ini menghitung *Heat Flux*, *Load Step*, dan waktu pengelasan untuk diinput kedalam Ansys Transient Thermal.

➤ *Input Jumlah Load Step*

Setelah mendapatkan jumlah total *load step* yang terjadi pada seluruh area pengelasan.

➤ Pengaturan Waktu Pada Setiap *Load Step*

Tahap ini melakukan input waktu yang didapat dari perhitungan sebelumnya untuk mengisi batas waktu setiap *Load Step*.

➤ Pengaturan *Heat Flux* Untuk Setiap *Load Step*

Setelah jumlah *Load Step* dan Waktu sudah diatur pada Ansys Transient Thermal *Heat Flux* diinput sesuai dengan *Load Step*.

➤ *Solve*

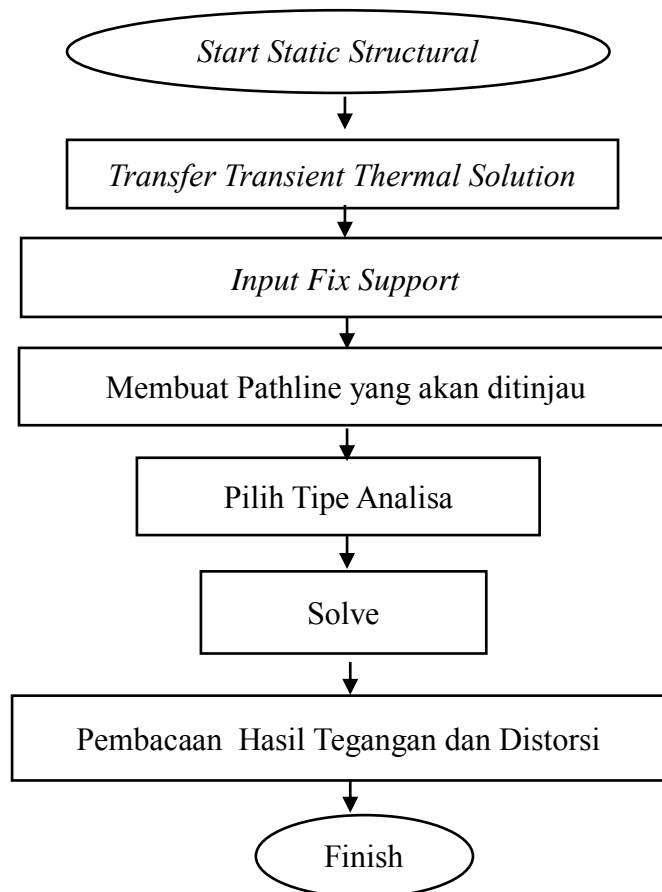
Langkah selanjutnya ketika pembebanan dan waktu pembebanan sudah selesai dilakukan adalah melakukan solusi pembebanan. Waktu dalam proses *solve* ini tergantung dari jumlah node pada model, kapasitas hard disk dan memori komputer yang dipakai.

➤ Pembacaan Hasil Analisa Thermal

Setelah Proses Running, maka didapatkan hasil reaksi model terhadap pembebanan. Hasil dari proses ini berupa ilustrasi efek pembebanan thermal pada model akibat pengelasan.

1.2.5 ANALISA STRUKTURAL

Setelah dilakukan analisis thermal, selanjutnya adalah melakukan analisis structural dengan menggunakan hasil output dari analisis thermal berupa regangan thermal diubah menjadi regangan struktural. Proses analisa thermal dapat dilihat dalam diagram alir Gambar 3.5.



Gambar 3.3 Diagram Alir Analisa Struktural

Penjelasan diagram alir analisa struktural (Gambar 3.3) adalah sebagai berikut:

➤ *Start Static Struktural*

Sebelum memulai analisa harus dipilih jenis penyelesaian masalah yang akan digunakan pemodelan. Untuk mendapatkan tegangan sisa dan distorsi diperlukan Ansys Static Struktural.

➤ *Transfer Transient Thermal Solution*

Mentransfer Solution yang didapat dari *Ansys Transient Thermal* ke dalam *Ansys Static Struktural*. Sehingga bisa langsung diteruskan tanpa harus input thermal kembali

➤ *Input Fix Support*

Setelah mentransfer *Transient Thermal Solution* langkah selanjutnya adalah pemilihan tumpuan yang difix sehingga data dari distorsi dan tegangan sisa bisa didapatkan

➤ *Membuat Path yang akan ditinjau*

Membuat Path ini dapat dilakukan dengan menambahkan garis bantu dalam geometry yang beracuan pada dua koordinat yang ada dalam model Sehingga membentuk garis untuk meninjau daerah yang diinginkan.

➤ *Pilih Tipe Analisa*

Tipe analisa yang dipilih dalam tugas akhir ini adalah tegangan sisa dan total distorsi yang terjadi pada model.

➤ *Solve*

Setelah semua yang diperlukan sudah dilakukan dengan benar maka pada langkah ini dilakukan analisis pada *Ansys Static Struktural*.

➤ *Pembacaan Hasil Pembebanan Thermal*

Hasil dari tahap *solve* analisa struktural berupa tegangan sisa dan distorsi yang terjadi pada *path* yang ditinjau. Distorsi ini dapat dilihat berdasarkan fungsi waktu dan fungsi posisi. Hasil analisa struktural berupa gambar tegangan sisa pada model dan grafik fungsi waktu yang dipilih.

3.2.6. VALIDASI HASIL

Selanjutnya adalah validasi hasil tegangan sisa yang didapatkan pada tahapan sebelumnya berupa tegangan sisa akan dicek dan dibandingkan dengan tegangan sisa yang di dapatkan dari hasil simulasi.

3.2.7. PENGARUH POST WELD HEAT TREATMENT (PWHT)

Memberi perlakuan PWHT dengan memberikan beban panas kembali selama waktu tahanan tertentu. PWHT dilakukan dengan variasi suhu dan waktu tahanan.

3.2.8. ANALISA HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah didapatkan tegangan sisa hasil running permodelan dari software ANSYS maka akan didapatkan tegangan sisa dan setelah diberi perlakuan PWHT, maka akan dibandingkan seberapa besar pengaruh dari PWHT terhadap tegangan sisa.

3.2.9. KESIMPULAN

Hasil analisa pada tugas akhir ini merupakan tegangan sisa yang terjadi pada sambungan yang ada di PHE-24. Sehingga dapat dihasilkan kesimpulan berdasarkan tujuan analisa.

3.2.10. PENULISAN LAPORAN

Setelah didapat kesimpulan dari hasil analisa, lalu menuliskan laporan sesuai proses yang dilakukan selama melakukan penelitian.

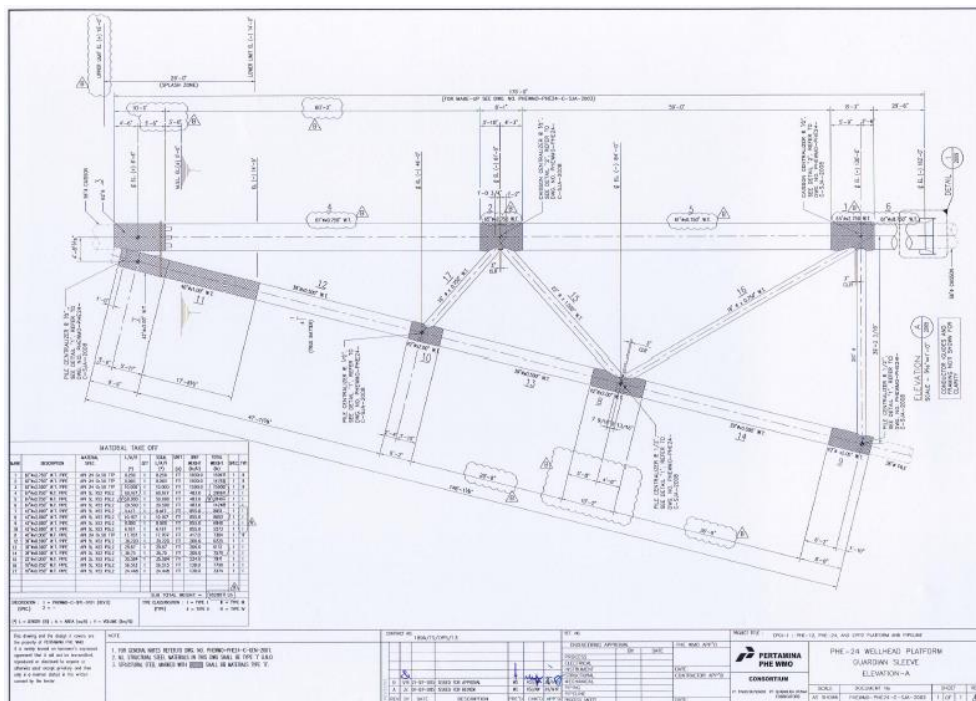
BAB IV

ANALISA DAN PEMBAHASAN

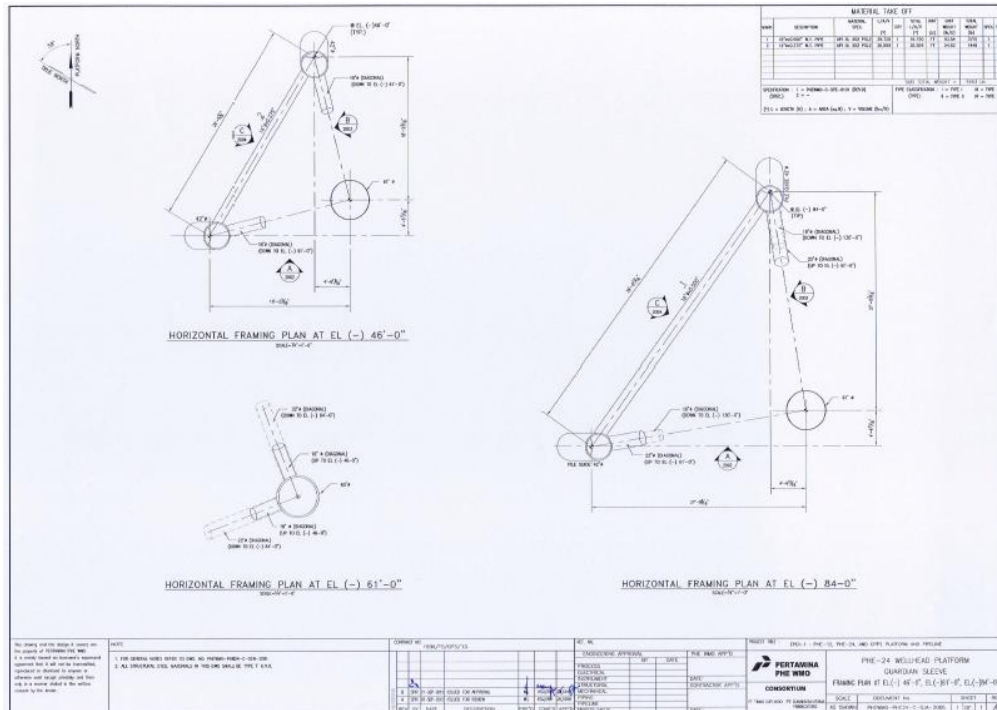
4.1. PEMODELAN STRUKTUR

Dalam tugas akhir ini memodelkan jacket PHE-24 milik PT. Pertamina Hulu Energi West Madura Offshore yang dikerjakan oleh PT. Gunanusa Utama Fabricator. Data-data struktur yang dibutuhkan untuk tugas akhir ini didapat dari PT. Gunanusa Utama Fabricator seperti data dimensi dan welding procedure specification (WPS). Permodelan sambungan tubular dalam tugas akhir ini menggunakan AutoCAD 2013 sesuai dengan dimensi dan bentuk geometri yang ada dalam data. Tetapi untuk pemodelan *Shell Element* ini ketebalan tidak dimasukkan kedalam model AutoCAD 2013.

Setelah geometri selesai dibuat maka model sambungan tubular akan dikonversikan ke ANSYS 16.2 untuk melakukan analisa thermal. Berikut data geometri jacket dari PT. Gunanusa Utama Fabricator pada Gambar 4.1 dan 4.2.

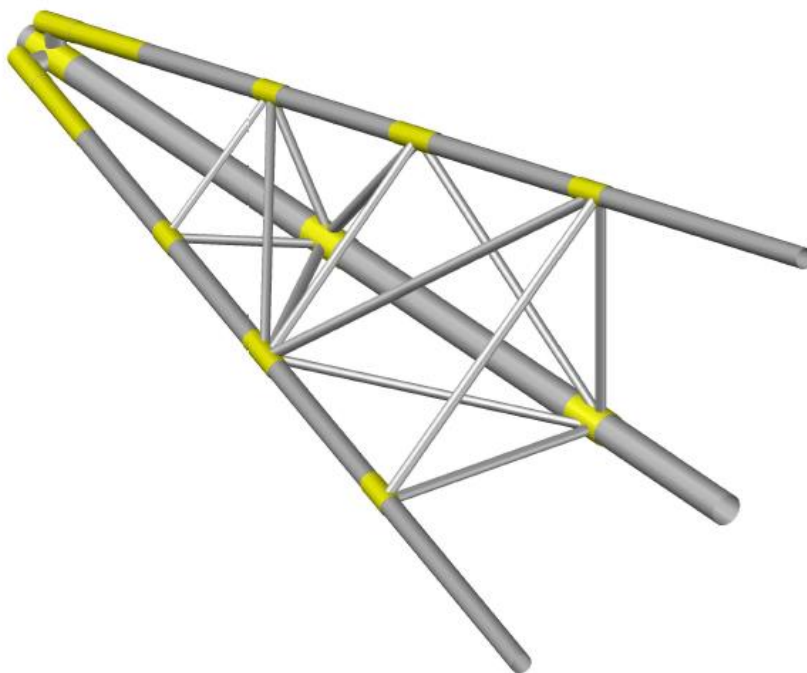


Gambar 4.1 Dimensi Jacket dari samping

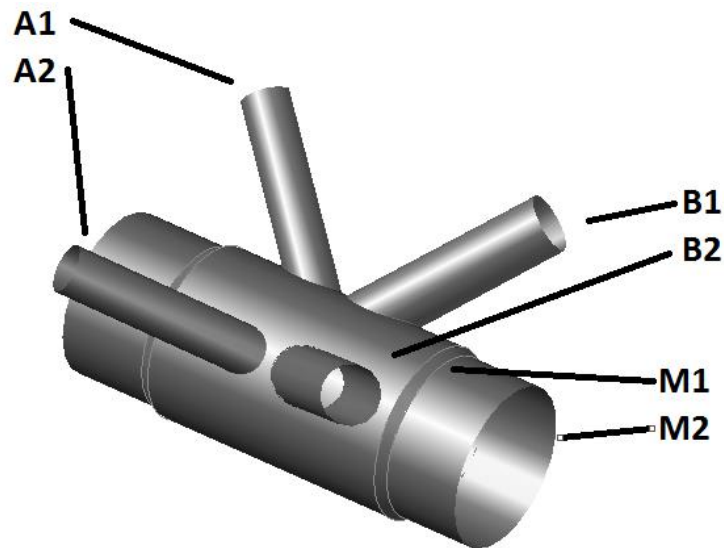


Gambar 4.2 Dimensi tiga elevasi pada jacket dari atas

Memodelkan menggunakan AutoCAD 2013 dengan menggunakan data yang berhasil dikumpulkan. Dengan menggunakan surface 3D modeling maka mendapatkan hasil seperti pada Gambar 4.3 dan 4.4, dengan data dimensi pada Tabel 4.1.



Gambar 4.3 Model jacket PHE-24 menggunakan AutoCAD 2013



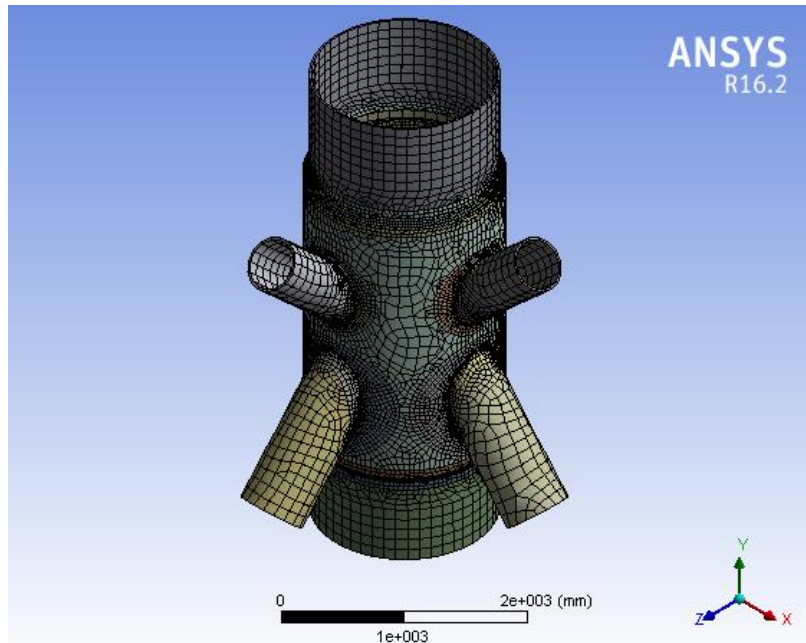
Gambar 4.4 Model joint tubular multiplanar tipe K

Tabel 4.1 Data dimensi tubular multiplanar tipe K

Tubular	Keterangan	
	OD (inch)	t (inch)
A1	18	0,75
A2	18	0,75
B1	22	1
B2	22	1
M1	65	2,75
M2	61	0,75

4.2. MESHING

Sebelum dilakukan pembebanan thermal pada model perlu dilakukan meshing. Meshing adalah pembagian model menjadi elemen-elemen. Variasi panjang meshing akan menghasilkan jumlah node yang berbeda. Pemilihan bentuk dan ukuran meshing akan sangat berpengaruh pada hasil. Model akan di-meshing seperti pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Hasil meshing pada joint tubular dengan ANSYS workbench 16.2

Bentuk dan ukuran meshing pada daerah lasan lebih rapat daripada yang berada diluar lasan. Hal ini dilakukan untuk memperingan kerja dari computer.

4.3. PERHITUNGAN BEBAN HEAT FLUX

Simulasi pengelasan pada sambungan tubular akan diberikan pada tiap permukaan elemen yang akan ditransfer menjadi beban. Beban yang diberikan merupakan heat flux dimana besaran diperoleh dari heat input bersih yang mengenai tiap elemen. Para meter pengelasan yang digunakan untuk mensimulasikan sambungan lasan.

Proses	: <i>Single Pass SMAW</i>
Jenis lasan	: <i>Shielded Metal Arc Welding</i>
Arus	: 150 A
Voltase	: 25 V
Kecepatan las	: 100 mm/min
Diameter Elektroda	: 4 mm

1. Beban Heat Flux Untuk Brace A1 dan A2

Dari persamaan 2.1 dapat dihitung efektif *heat input*, Q untuk pengelasan *single pass* SMAW. Sehingga efektif *heat input* yang dihasilkan adalah sebagai berikut

➤ Heat input

$$Q = \eta U I$$

Dimana:

Q : Net heat input (Watt)

η : Koefisien efisiensi

U : Tegangan busur (Volt)

I : Arus Listrik (Ampere)

Dengan:

η : 0.75

U : 25 volt

I : 150 Ampere

$$Q = \eta U I$$

$$= 0.75 \times 25 \times 150$$

$$= 2812.5 \text{ watt}$$

➤ Heat flux tiap elemen

$$q_1 = q_e \frac{A_1}{A_f}$$

Dimana:

q_1 : *heat flux* pada elemen (J/mm^2)

q_e : *heat flux* yang dihasilkan elektroda (J/mm^2)

A_1 : luas permukaan elemen (mm^2)

A_f : luasan fluks yang dihasilkan elektroda (mm^2)

➤ Menghitung *Heat Flux* Elektroda

$$q_e = \frac{Q}{A_f} \quad ; \quad A_f : \text{luasan fluks yang dihasilkan elektroda}$$

$$q_e = \frac{Q}{\pi r^2} \quad ; \quad r : \text{jari-jari elektroda}$$

$$q_e = \frac{2812.5}{\pi \cdot 2^2}$$

$$q_e = 223.925 \text{ watt/mm}^2$$

➤ Menghitung Luas Elemen

Luas area yang dilas dan jumlah elemen meshing dalam area las didapatkan dari software Ansys untuk menghitung luas elemen.

$$A_1 = \frac{A}{n \text{ elemen}}$$

Dimana,

A : Luas Area yang dilas

n elemen : jumlah elemen meshing dalam area las

dengan,

$$A = 64109 \text{ mm}^2$$

$$n \text{ elemen} = 186$$

maka,

$$A_1 = \frac{64109}{186}$$

$$A_1 = 344.67 \text{ mm}^2$$

➤ Menghitung waktu pengelasan pada satu area

Untuk menghitung waktu pengelasan pada suatu area dibutuhkan panjang area pengelasan, panjang area pengelasan didapat dari software ansys.

$$t = \frac{p}{v}$$

Dimana,

t = waktu pengelasan pada satu area

p = Panjang area pengelasan

v = kecepatan pengelasan

Dengan,

$$p = 1698.2 \text{ mm}$$

$$v = 100 \text{ mm/min}$$

$$v = 1.66 \text{ mm/s}$$

maka,

$$t = \frac{1698.2}{1.66}$$

$$t = 1023.01 \text{ detik}$$

➤ Menghitung Luasan *Flux* yang Dihasilkan Elektroda

$$A_f = b \cdot v \cdot t$$

Dimana,

b : Lebar area las

v : Kecepatan pengelasan

t = waktu pengelasan satu area

dengan,

$$b = 34.13 \text{ mm}$$

$$v = 1.66 \text{ mm/s}$$

$$t = 1023.01 \text{ s}$$

maka,

$$A_f = b \cdot v \cdot t$$

$$A_f = 34.13 \times 1.66 \times 1023.01$$

$$A_f = 137.697,2 \text{ mm}^2$$

Setelah melakukan perhitungan-perhitungan di atas, selanjutnya adalah melakukan perhitungan *heat flux*.

$$q_1 = q_e \frac{A_1}{A_f}$$

$$q_1 = 223.92 \frac{344.67}{137,692.2}$$

$$q_1 = 1.33 \text{ watt/mm}^2$$

Dari perhitungan di atas diketahui beban heat flux yang mengenai elemen adalah sebesar 1.33 watt/mm^2 . Beban *heat flux* ini akan diaplikasikan pada tiap elemen secara *transient*.

2. Beban Heat Flux Untuk Brace B1 dan B2

Setelah melakukan perhitungan-perhitungan di atas, selanjutnya adalah melakukan perhitungan *heat flux*.

$$q_1 = q_e \frac{A_1}{A_f}$$

$$q_1 = 223.92 \frac{361.3}{76,026.3}$$

$$q_1 = 1.06 \text{ watt/mm}^2$$

Dari perhitungan di atas diketahui beban heat flux yang mengenai elemen adalah sebesar 1.06 watt/mm². Beban *heat flux* ini akan diaplikasikan pada tiap elemen secara *transient*.

3. Beban Heat Flux Untuk Brace At dan Bw

Setelah melakukan perhitungan-perhitungan di atas, selanjutnya adalah melakukan perhitungan *heat flux*.

$$q_1 = q_e \frac{A_1}{A_f}$$

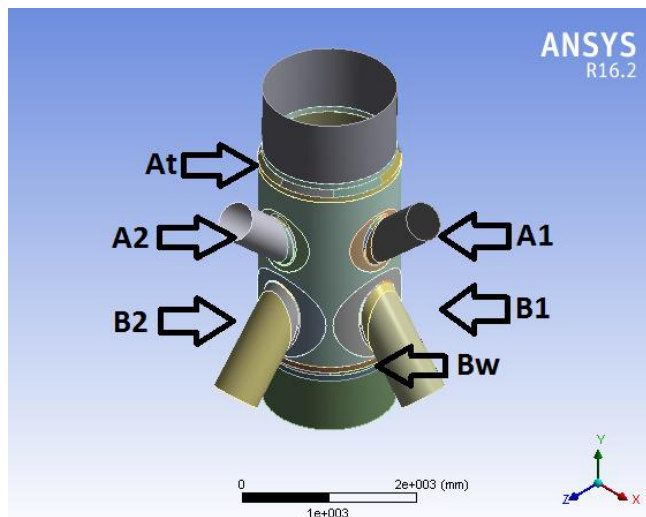
$$q_1 = 223.92 \frac{552.2}{475,098.9}$$

$$q_1 = 0.26 \text{ watt/mm}^2$$

Dari perhitungan di atas diketahui beban heat flux yang mengenai elemen adalah sebesar 0.26 watt/mm². Beban *heat flux* ini akan diaplikasikan pada tiap elemen secara *transient*.

4.4. PENENTUAN STEP DAN WAKTU PENGELASAN

Penentuan step dan waktu pengelasan dihitung berdasarkan panjang daerah pengelasan dibagi dengan kecepatan pengelasan. Dalam Ansys Workbench 16.2 bisa ditinjau panjang suatu daerah sehingga didapatkan hasil seperti Table 4.2.



Gambar 4.6 Daerah-daerah Pengelasan yang Ada pada Model

Tabel 4.2 Data panjang setiap area pengelasan

Keterangan	Panjang
At	5186,8 mm
Bw	5186,8 mm
A1	1698,2 mm
A2	1698,2 mm
B1	2265,4 mm
B2	2265,4 mm

Setelah mengetahui panjang daerah pengelasan maka dilakukan pembagian dengan kecepatan pengelasan sesuai dengan data. Sehingga didapatkan waktu untuk setiap pengelasan sesuai dengan Table 4.3.

Tabel 4.3 Waktu satu pengelasan pada satu area pengelasan

Kecepatan	100 mm/min
Daerah Pengelasan	Waktu satu area Pengelasan
At	3112,08 sec
Bw	3112,08 sec
A1	1018,92 sec
A2	1018,92 sec
B1	1359,24 sec
B2	1359,24 sec

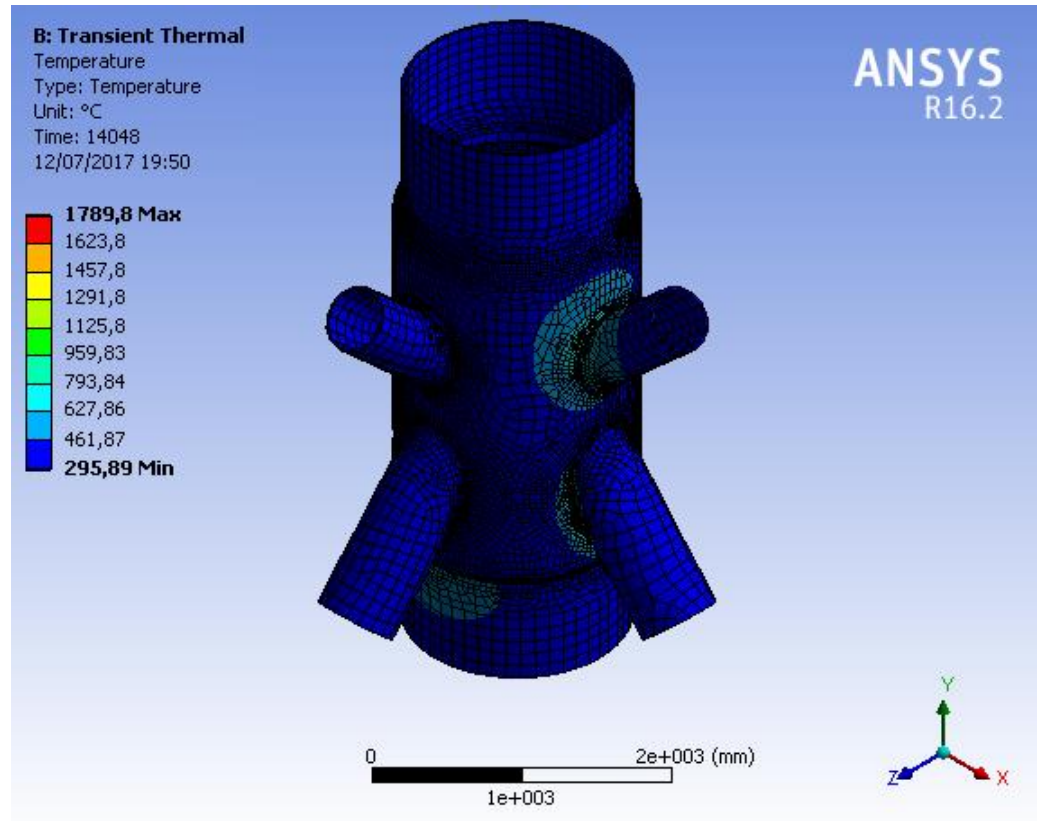
Lalu dibagi sesuai dengan pembagian dalam pemodelan las pada model yaitu 8 sehingga mendapatkan jumlah *step* dan waktu pengelasan seperti pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Step dan waktu untuk setiap pengelasan

At		A1		A2	
Step	Waktu (s)	Step	Waktu (s)	Step	Waktu (s)
1	389	17	6351,52	33	10263,41
2	778,01	18	6740,53	34	10652,42
3	1167,02	19	7129,54	35	11041,43
4	1556,03	20	7518,55	36	11430,44
5	1945,04	21	7907,56	37	11819,45
6	2334,05	22	8296,57	38	12208,46
7	2723,06	23	8685,58	39	12597,47
8	3112,07	24	9074,59	40	12986,48
Bw		B1		B2	
Step	Waktu (s)	Step	Waktu (s)	Step	Waktu (s)
9	3501,08	25	9244,49	41	13156,39
10	3890,09	26	9371,86	42	13283,75
11	4279,1	27	9499,22	43	13411,12
12	4668,11	28	9626,59	44	13538,48
13	5057,12	29	9753,95	45	13665,85
14	5446,13	30	9881,32	46	13793,21
15	5835,14	31	10008,68	47	13920,58
16	6224,15	32	10136,05	48	14047,94

4.5. HASIL ANALISA THERMAL

Pada saat pengelasan terjadi beban panas yang dapat menyebabkan terjadinya regangan dan tegangan pada daerah yang terkena dampak lasan. Selain itu simulasi pengelasan dalam tugas akhir ini juga menghasilkan distribusi panas daerah sekitar lasan. Suhu pengelasan yang ditinjau pada saat awal pengelasan. Distribusi panas yang terjadi pada model ditunjukkan pada Gambar 4.7.



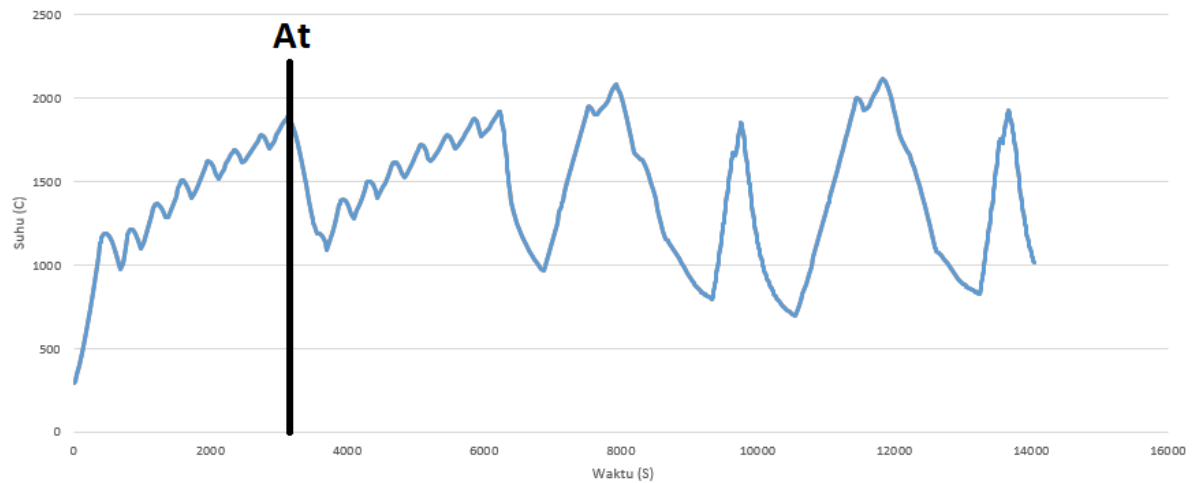
Gambar 4.7 Hasil analisa thermal pada joint tubular dengan ANSYS workbench 16.2

4.5.1. DISTRIBUSI PANAS

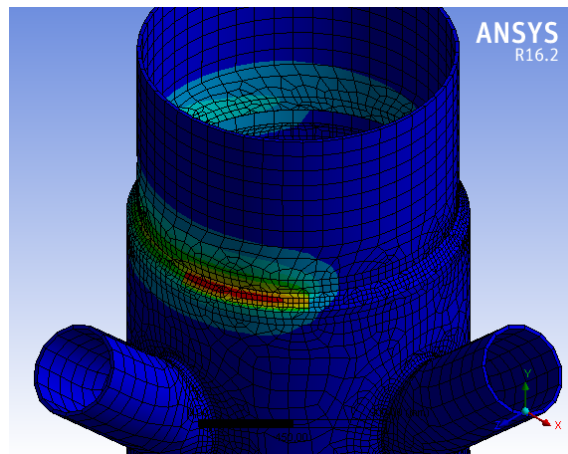
Untuk mengetahui suhu maksimal pengelasan pada setiap Daerah pengelasan yang sudah ditentukan dapat didapat dari beban *Heat Flux*. Siklus pengelasan yang disimulasikan dimulai dari At-Bw-A1-B1-A2-B2 sehingga setiap puncak dari grafik berikut adalah suhu maksimum dari setiap daerah pengelasan. Setelah itu suhu menurun mendekati suhu lingkungan (22 C) sesuai dengan lamanya waktu pendinginan.

1. Daerah Pengelasan At

Maka didapatkan suhu maksimum dari daerah pengelasan At sebesar 1886.2 C seperti pada Gambar 4.8. Distribusi panas yang terjadi pada daerah pengelasan At ditunjukkan pada Gambar 4.9.



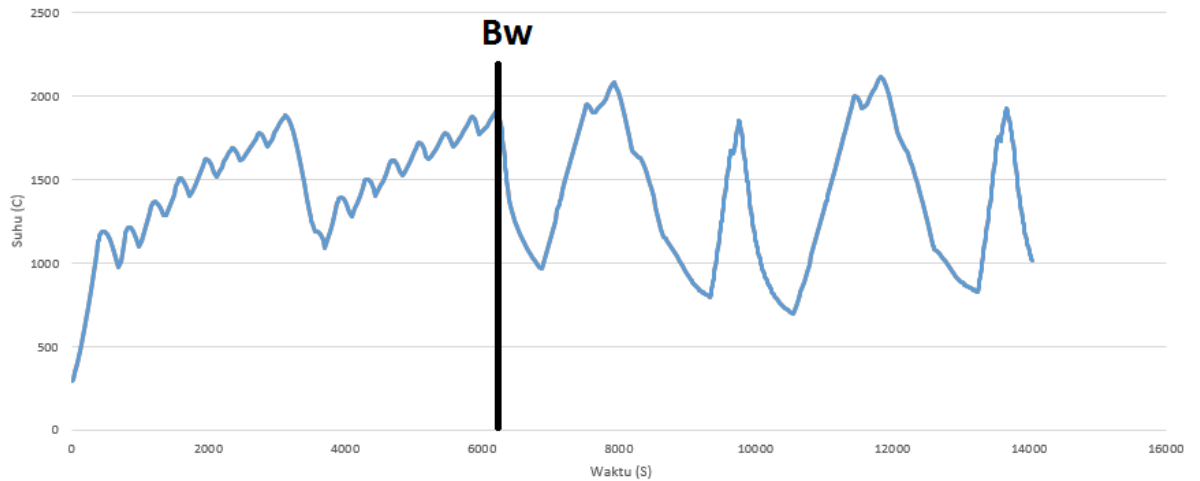
Gambar 4.8 Grafik Suhu Maksimum pada Daerah Pengelasan At



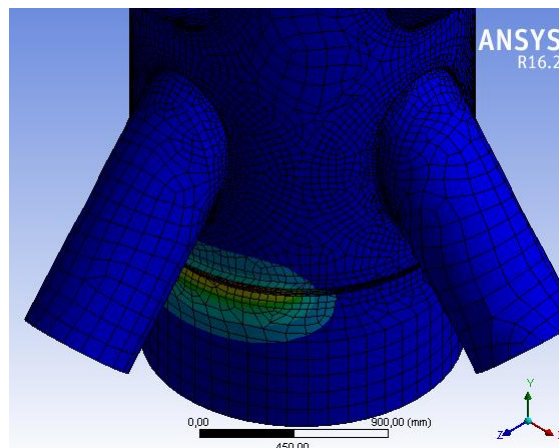
Gambar 4.9 Distribusi Panas yang Terjadi pada Daerah Pengelasan At

2. Daerah Pengelasan Bw

Maka didapatkan suhu maksimum dari daerah pengelasan Bw sebesar 1873.2 C seperti pada Gambar 4.10. Distribusi panas yang terjadi pada daerah pengelasan Bw ditunjukkan pada Gambar 4.11.



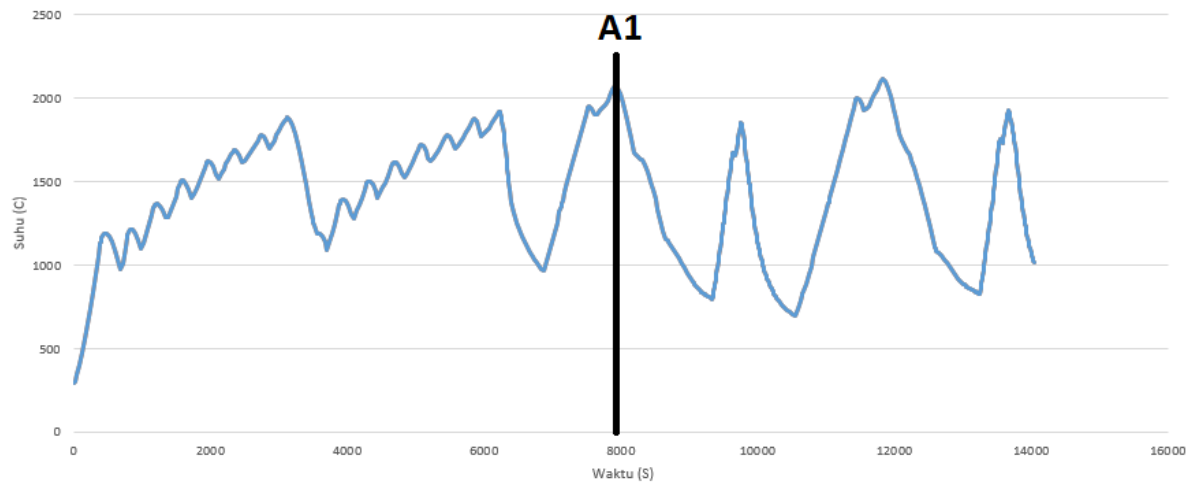
Gambar 4.10 Grafik Suhu Maksimum pada Daerah Pengelasan Bw



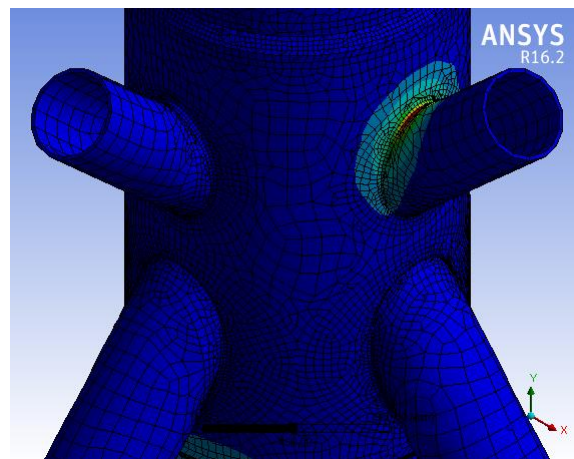
Gambar 4.11 Distribusi Panas yang Terjadi pada Daerah Pengelasan Bw

3. Daerah Pengelasan A1

Maka didapatkan suhu maksimum dari daerah pengelasan A1 sebesar 2060,7 C seperti pada Gambar 4.12. Distribusi panas yang terjadi pada daerah pengelasan A1 ditunjukkan pada Gambar 4.13.



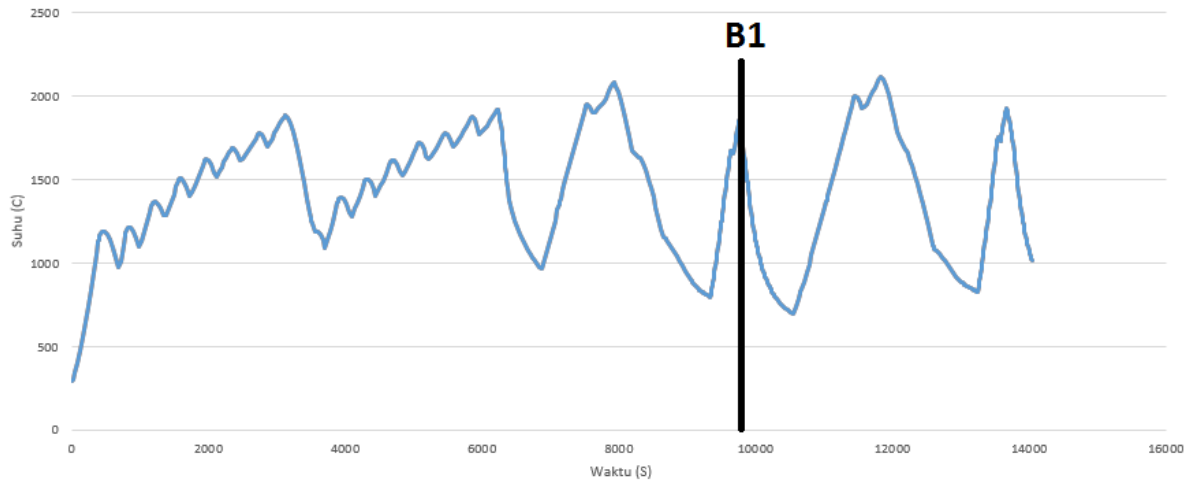
Gambar 4.12 Grafik Suhu Maksimum pada Daerah Pengelasan A1



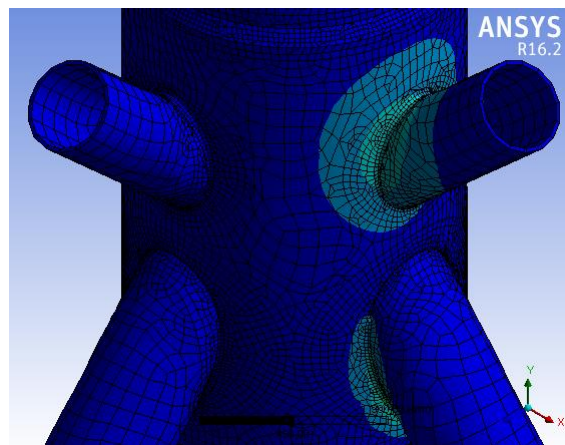
Gambar 4.13 Distribusi Panas yang Terjadi pada Daerah Pengelasan A1

4. Daerah Pengelasan B1

Maka didapatkan suhu maksimum dari daerah pengelasan B1 sebesar 1884.4 C seperti pada Gambar 4.14. Distribusi panas yang terjadi pada daerah pengelasan B1 ditunjukkan pada Gambar 4.15.



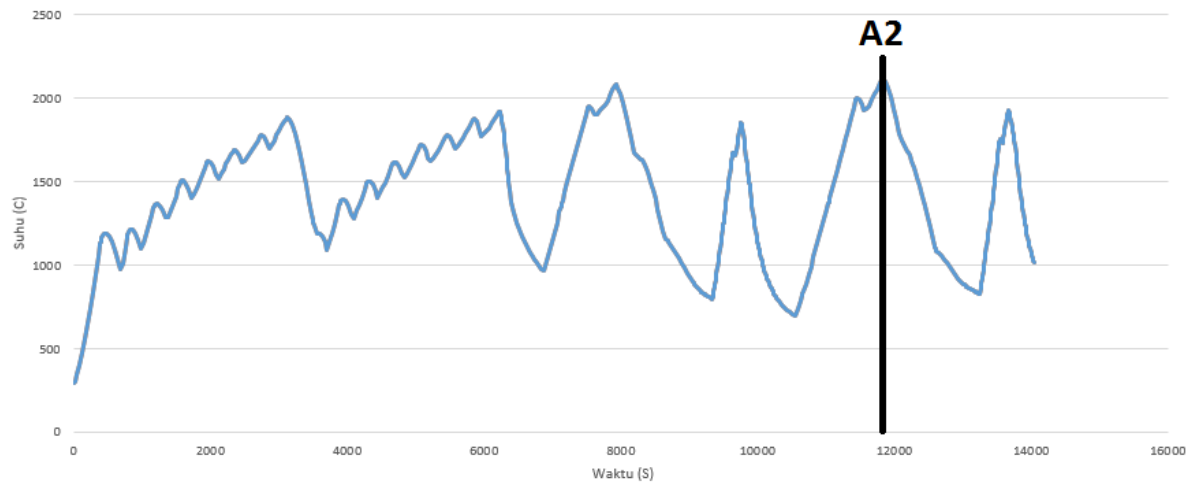
Gambar 4.14 Grafik Suhu Maksimum pada Daerah Pengelasan B1



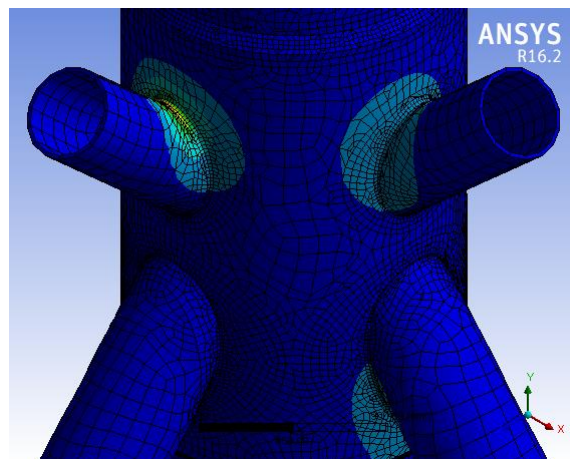
Gambar 4.15 Distribusi Panas yang Terjadi pada Daerah Pengelasan B1

5. Daerah Pengelasan A2

Maka didapatkan suhu maksimum dari daerah pengelasan A2 sebesar 2111,9 C seperti pada Gambar 4.16. Distribusi panas yang terjadi pada daerah pengelasan A2 ditunjukkan pada Gambar 4.17.



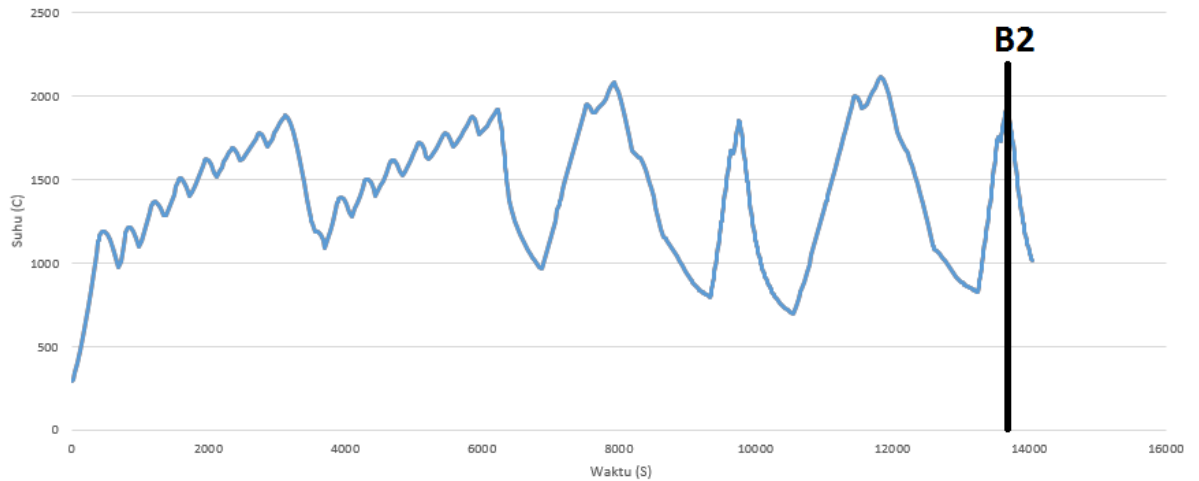
Gambar 4.16 Grafik Suhu Maksimum pada Daerah Pengelasan A2



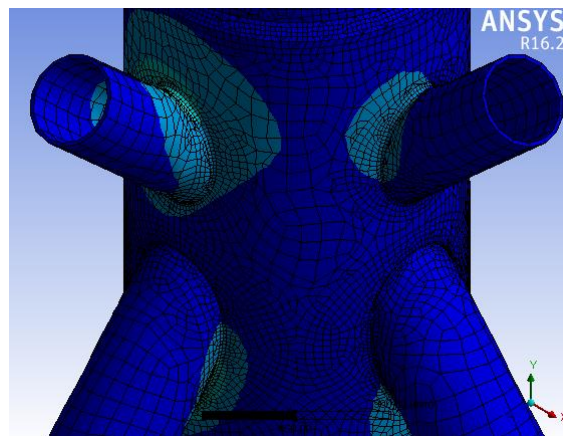
Gambar 4.17 Distribusi Panas yang Terjadi pada Daerah Pengelasan A2

6. Daerah Pengelasan B2

Maka didapatkan suhu maksimum dari daerah pengelasan B2 sebesar 1918,4 C seperti pada Gambar 4.18. Distribusi panas yang terjadi pada daerah pengelasan B2 ditunjukkan pada Gambar 4.19.



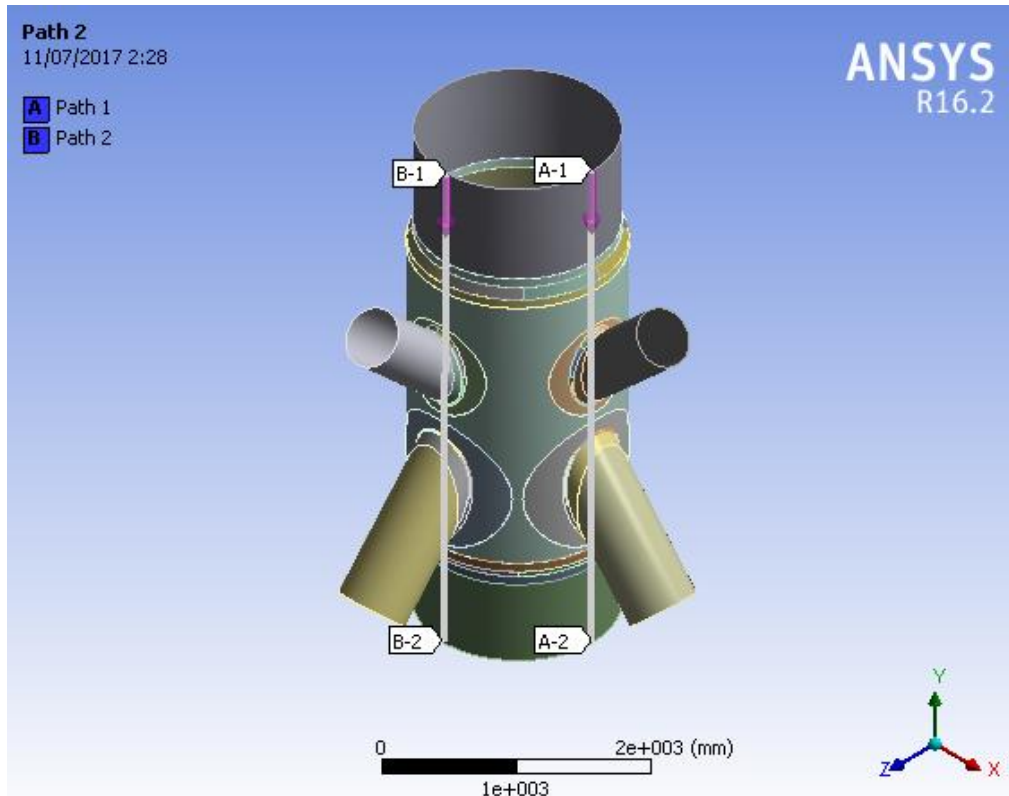
Gambar 4.18 Grafik Suhu Maksimum pada Daerah Pengelasan B2



Gambar 4.19 Distribusi Panas yang Terjadi pada Daerah Pengelasan B2

4.6. DISTRIBUSI TEGANGAN SISA DAN DISTORSI YANG TERJADI PADA SAMBUNGAN TUBULAR

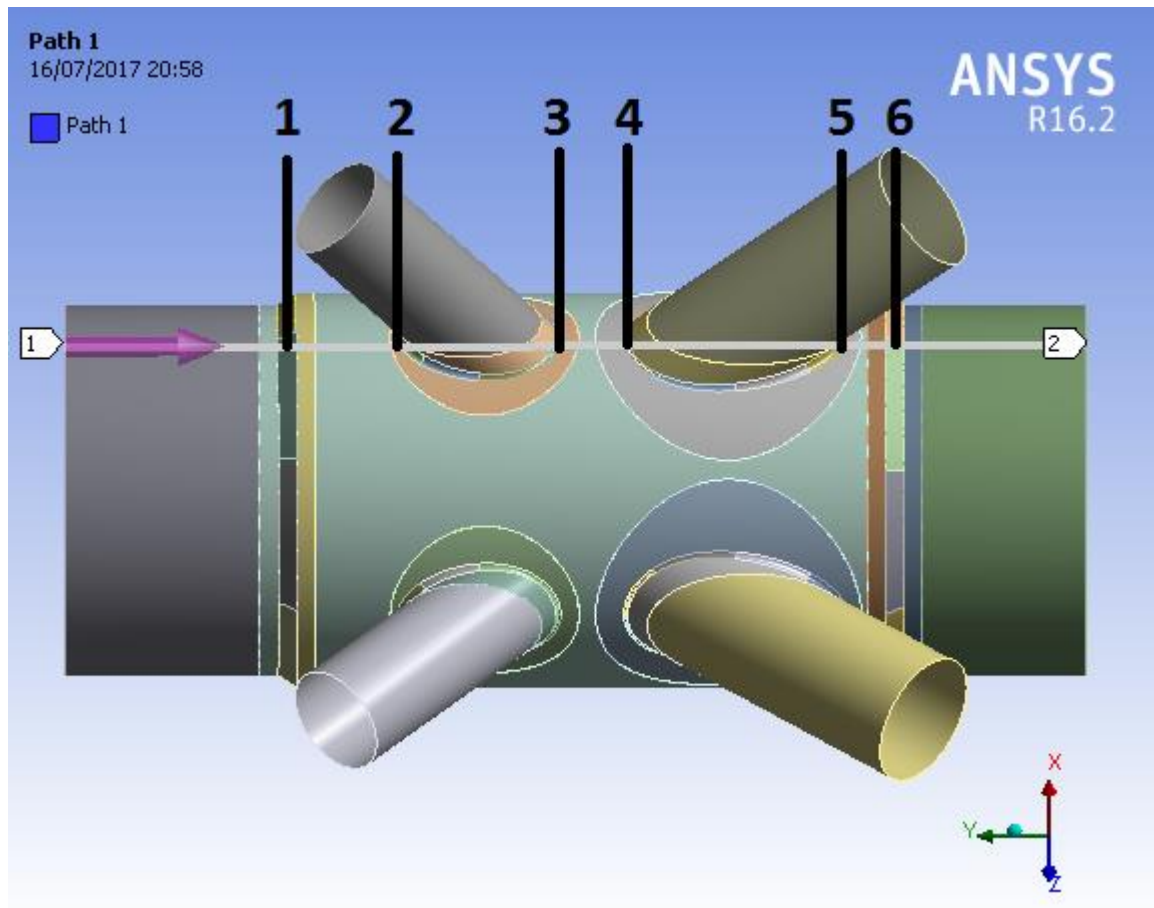
Penentuan tegangan sisa ditinjau berdasarkan path atau garis sumbu untuk mengetahui besarnya tegangan sisa di bagian yang dilewati path tersebut. Pembacaan tegangan sisa dilakukan pada daerah permukaan chord yang sebelumnya telah dilakukan berdasarkan path yang telah dibuat. Path pada chord terdiri dari 2 bagian searah dengan sumbu-y dan melewati masing-masing area lasan pada brace. Gambar 4.20. menjelaskan path untuk menentukan nilai tegangan sisa.



Gambar 4.20 Path pada Chord untuk pembacaan Tegangan sisa

4.6.1. DISTRIBUSI TEGANGAN SISA PADA PATH 1

Dalam Gambar 4.21. dan Gambar 4.22. terdapat grafik yang menunjukkan distribusi tegangan sisa sesuai dengan path yang telah ditentukan. Tegangan sisa yang terjadi di daerah dekat area pengelasan merupakan tegangan tarik dan memiliki nilai tegangan terbesar. Sedangkan di titik yang berjarak semakin jauh dengan weldtoe maka nilainya akan semakin mendekati 0 (nol). Pada *Path 1* nilai tegangan sisa maksimal adalah sebesar 245.49 MPa yang terdapat pada daerah pengelasan A1.



Gambar 4.21 Path 1 Disesuaikan Dengan Titik Nol Grafik dari 1 ke 2

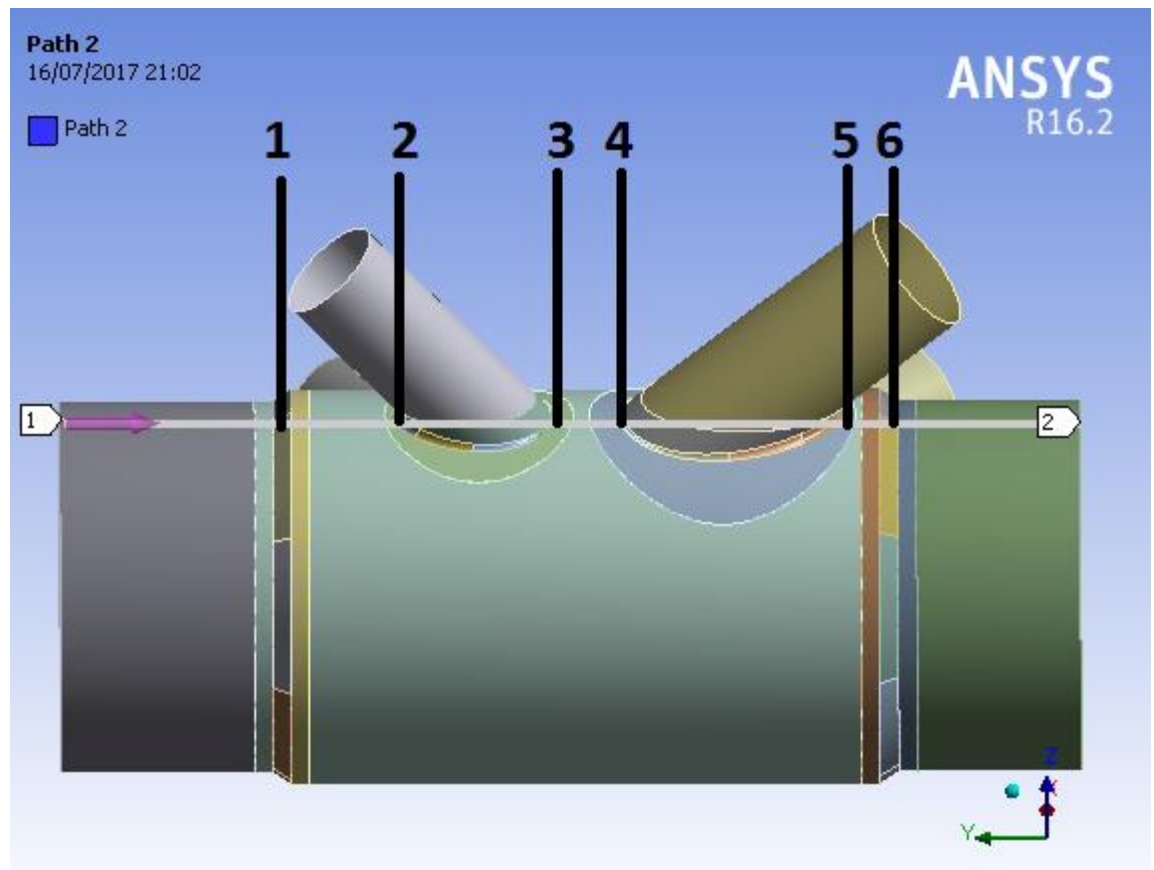


Gambar 4.22 Grafik Tegangan Sisa pada Path 1 (titik nol dari atas kebawah pada model)

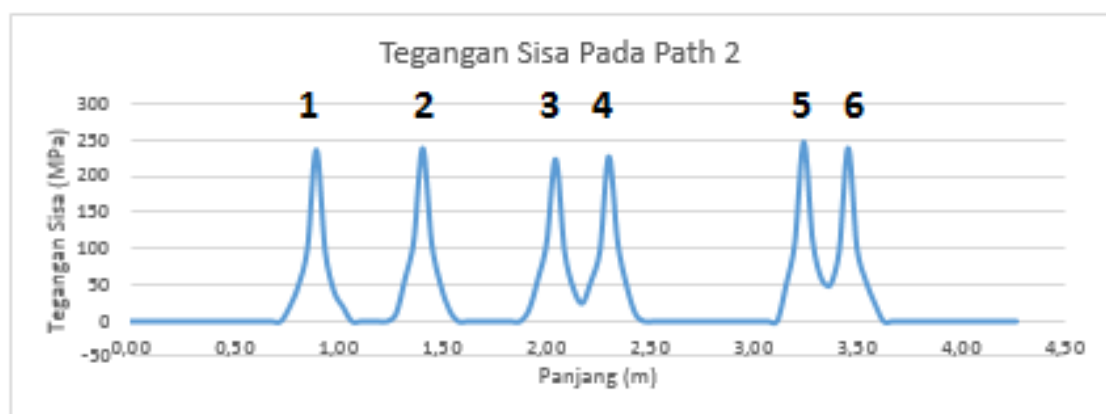
4.6.2. DISTRIBUSI TEGANGAN SISA PADA PATH 2

Dalam Gambar 4.11. dan Gambar 4.12. terdapat grafik yang menunjukkan distribusi tegangan sisa sesuai dengan path yang telah ditentukan. Tegangan sisa yang terjadi di daerah dekat area pengelasan merupakan tegangan tarik dan memiliki nilai tegangan terbesar. Sedangkan di titik yang berjarak semakin jauh dengan weldtoe maka nilainya akan semakin mendekati 0 (nol). Pada *Path 2* nilai

tegangan sisa maksimal adalah sebesar 246,852 MP yang terletak pada daerah pengelasan B2.



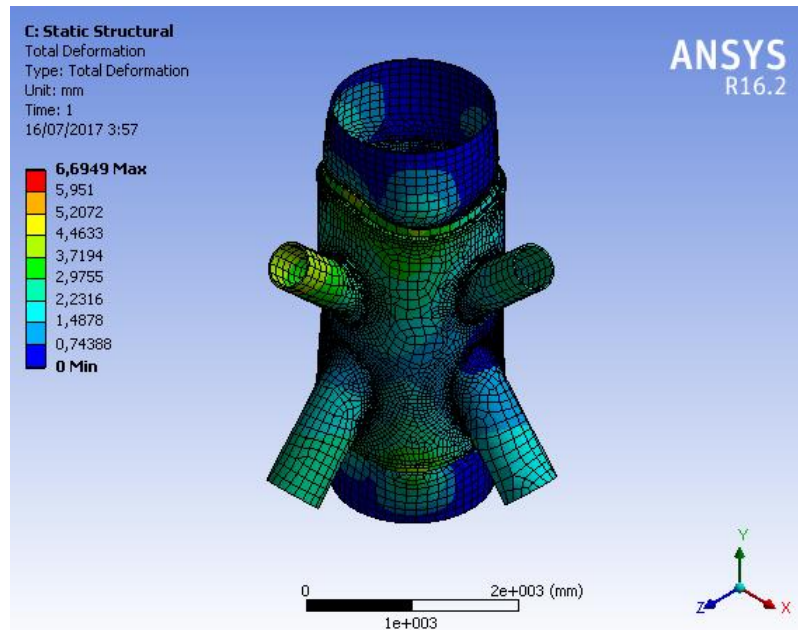
Gambar 4.23 Path 2 Disesuaikan Dengan Titik Nol Grafik dari 1 ke 2



Gambar 4.24 Grafik Tegangan Sisa pada Path 2 (titik nol dari atas kebawah pada model)

4.6.3. ANALISA TOTAL DEFORMASI

Dari hasil analisa deformasi didapatkan total deformasi terbesar berada pada ujung chord bagian kiri atas. Sebagai contoh pada gambar berikut ini ditampilkan total deformasi pada Gambar 4.13.



Gambar 4.25 Total deformasi yang terjadi pada struktur

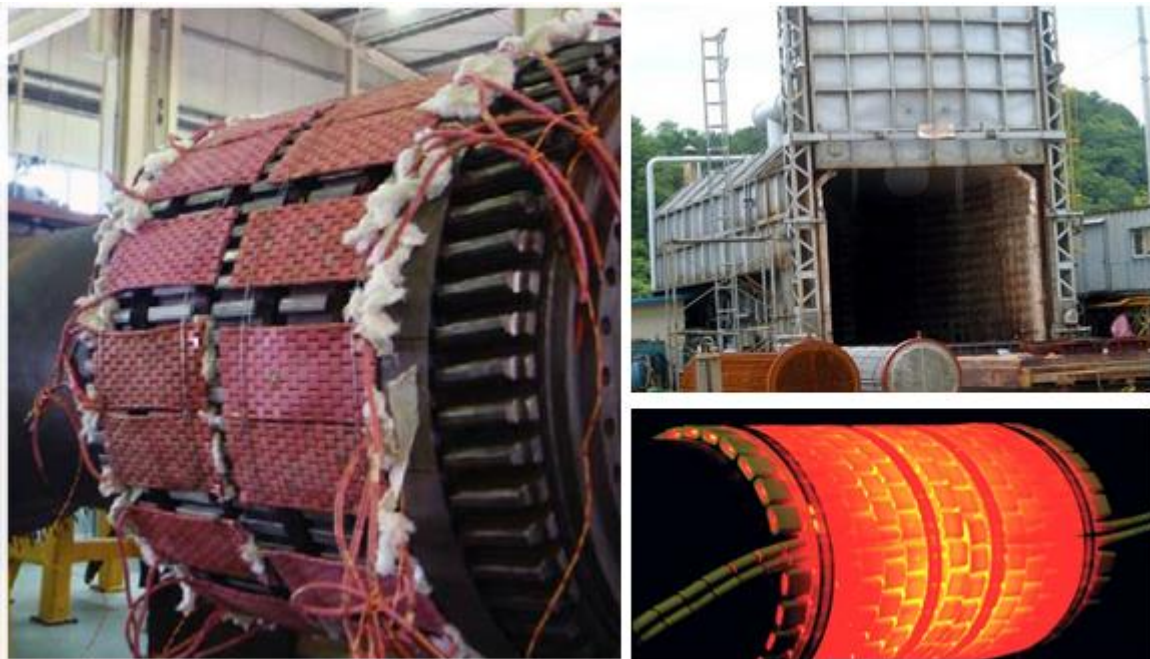
Dari gambar di atas distorsi yang terjadi pada brace bagian atas yaitu sebesar 6.694 mm atau 0.66 cm. Nilai deformasi yang terjadi dipengaruhi dengan adanya *boundary condition*. *Boundary condition* harus menyesuaikan antara model dengan kondisi struktur yang sebenarnya.

4.7. PENGARUH POST WELD HEAT TREATMENT PADA SAMBUNGAN TUBULAR

Simulasi *PWHT* ini dilakukan pada model dengan memberikan beban panas kembali sampai mencapai suhu tertentu dengan waktu tahan tertentu di daerah pengelasan. Dalam tugas akhir ini dilakukan 3 variasi *PWHT* seperti yang terinci pada Tabel 4.2 untuk melihat suhu dan waktu tahan yang membuat tegangan sisa berkurang banyak. Ilustrasi alat untuk melakukan *PWHT* dapat dilihat pada Gambar 4.26 dibawah ini.

Tabel 4.5 Variasi Suhu dan Waktu Tahan Post Weld Heat Treatment

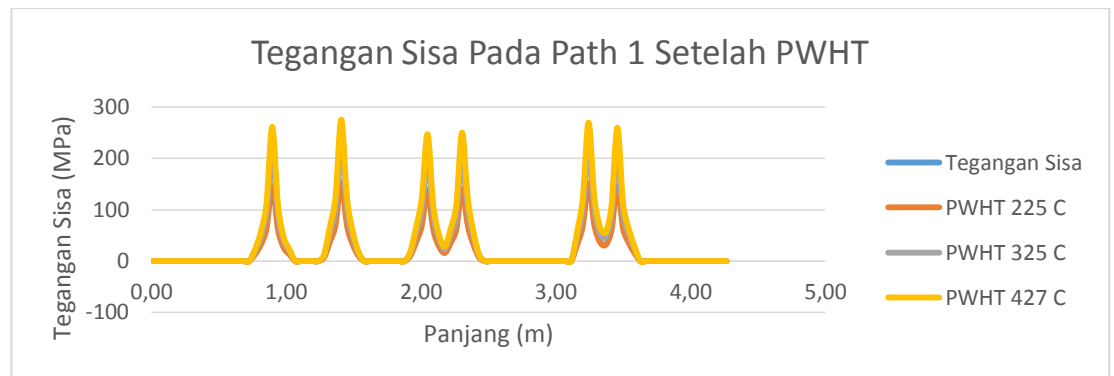
Suhu (C)	Waktu Tahan (jam)
255	4 jam
352	2,5 jam
427	2,5 jam



Gambar 4.26 Ilustrasi Alat Untuk Post Weld Heat Treatment (PWHT)

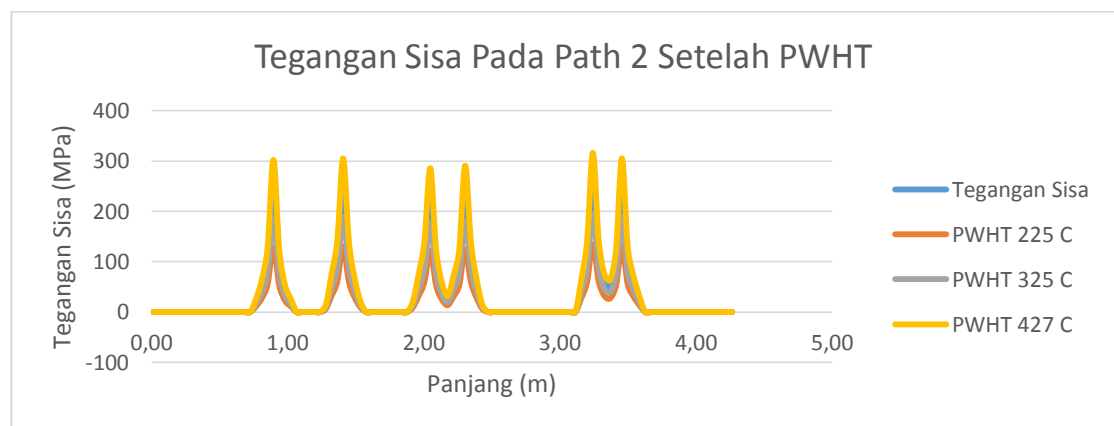
Untuk analisa tegangan sisa setelah *PWHT* akan ditinjau sesuai dengan path sebelum perlakuan *PWHT*. Tujuan dari *PWHT* adalah pengurangan tegangan sisa, sehingga analisa tegangan berfokus pada berkurangnya tegangan sisa. Berikut adalah grafik perbandingan tegangan sisa pada path 1 dan 2.

1. Path 1



Gambar 4.27 Grafik Distribusi Perbandingan Tegangan Sisa Pada Path 1 Setelah PWHT (titik nol dari atas kebawah pada model)

2. Path 2



Gambar 4.28 Grafik Distribusi Perbandingan Tegangan Sisa Pada Path 2 Setelah PWHT (titik nol dari atas kebawah pada model)

Dari Gambar 4.27 dan 4.28 di atas terjadi penurunan yang cukup signifikan pada tegangan sisa maksimal. Hasil tegangan sisa maksimum pada masing-masing path sebelum perlakuan PWHT pada sambungan tubular multiplanar tipe K adalah 245.49 MPa dan 246.85 MPa. Kemudian setelah diberi perlakuan Post Weld Heat Treatment tegangan sisa maksimal tersebut path 1 berturut-turut turun menjadi 155.02 Mpa, 224.78 Mpa, dan 275.89 Mpa. Dan pada path 2 berturut-turut turun menjadi 134.99 Mpa, 195.35 Mpa, dan 316.26 Mpa.

(halaman sengaja dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan, didapatkan nilai tegangan sisa dapat berkurang setelah diberi perlakuan PWHT. Berdasarkan analisis dan pembahasan yang dilakukan diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil tegangan sisa maksimum pada masing-masing path sebelum perlakuan PWHT pada sambungan tubular multiplanar tipe K adalah berturut-turut sebesar 245.49 MPa dan 246.85 MPa. Sedangkan untuk distorsi yang terjadi sebesar 6.694 mm Nilai deformasi yang terjadi dipengaruhi dengan adanya boundary condition. Boundary condition harus menyesuaikan antara model dengan kondisi struktur yang sebenarnya. Dari 2 (dua) path simulasi urutan pengelasan, tegangan sisa maksimal terkecil terjadi pada path 1.
2. Setelah diberi perlakuan PWHT tegangan sisa bisa turun. Pengurangan tegangan sisa maksimal terbesar terjadi pada path 2 sebesar 246.85 MPa dari tegangan sisa sebelum PWHT. Sedangkan pengurangan tegangan sisa maksimal terkecil pada path 2 dengan penurunan sebesar 111.86 MPa. Dari semua perlakuan *Post Weld Heat Treatment* maka semakin tinggi suhu PWHT pengurangan tegangan sisa maksimal tidak selalu semakin besar bergantung pada faktor waktu dan material.

5.2. SARAN

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian lebih lanjut mengenai Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Disarankan untuk menambahkan variasi waktu PWHT untuk mengetahui efek penambahan atau pengurangan waktu PWHT pada perubahan tegangan sisa.
2. Menambah variasi suhu PWHT untuk mengetahui efek penambahan suhu PWHT pada perubahan tegangan sisa.

3. Disarankan menambah variasi material PWHT untuk mengetahui efek penambahan material PWHT pada perubahan tegangan sisa.
4. Menambahkan jumlah potongan model pengelasan pada setiap titik pengelasan.

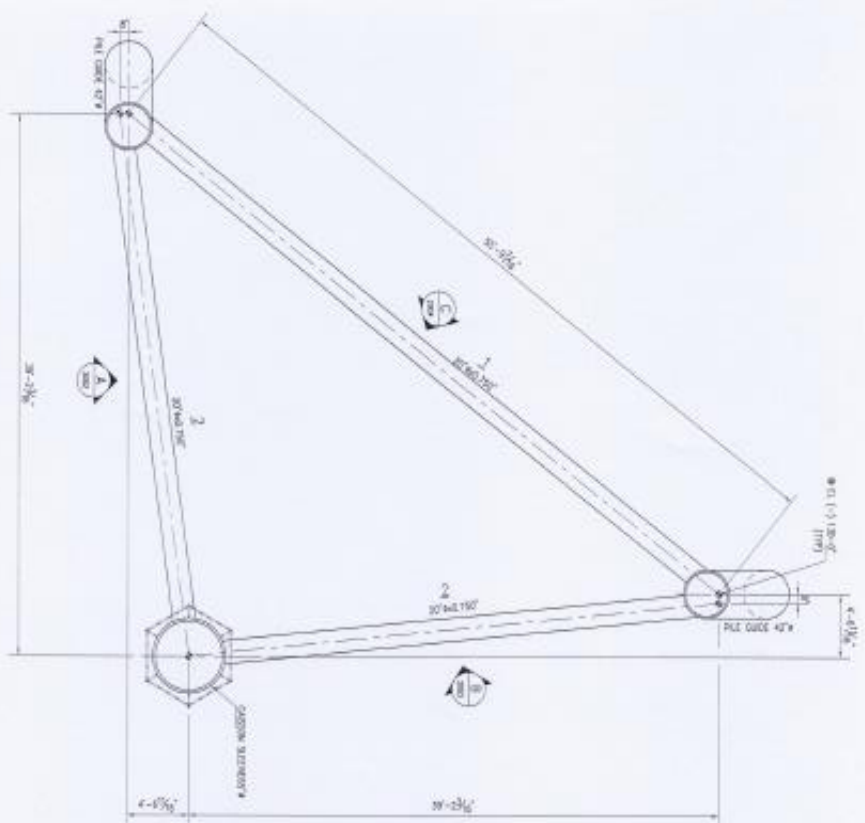
DAFTAR PUSTAKA

- ANSYS. 2010. *ANSYS Manual*. Release 12, ANSYS Inc.
- Affiz, Fuad. 2012. **Pengaruh Pengerolan Pra Pemanasan Dibawah Themperatur Rekristalisasi dan Tingkat Deformasi Terhadap Kekerasan dan Kekuatan Tarik serta Struktur Mikro Baja Karbon Sedang Untuk Mata Pisau Pemanenan Sawit**. Volume II, No.2. Universitas Sumatrera Utara
- Bang, I.W., Son, Y.P., Kim, Y.P., Kim, W.S., 2002. *Numerical Simulation of Sleeve Reapirs Weldinng In-Service Gas Pipelines*. Welding Journal.
- Cerik, B.C., Cho, S., 2013. *Numerical investigation on the ultimate strength of stiffened cylindrical shells*.
- Chen, Zhen. et al. 2015. *Influence of Welding Sequence on Welding Deformation and Residual Stress of a Stiffened Plate Structure*. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China.
- Conrardy, C., Huang, T.D., Harwig, D., Dong, P., Kvidahl, L., Evans, N., Treaster, A., 2006. *Practical welding techniques to minimize distortion in lightweight ship structures*. J. Ship Prod. 22 (4), 239–247.
- Deng, Dean., Murakawa,Hidekazu. 2008. *Prediction of welding distortion and residual stress in a thin plate butt-welded joint*. Journal of computation materials science.
- Fu, G.,Lourenco, M., Duan, M., Estefen, S., 2014. *Effect of Boundary Conditions on Residual Stress and Distortion in T-Joint Welds*. Journal of Construction Steel Research.
- Gannon, L. et al. 2010. *Effect of Welding Sequence on Residual Stress and Distortion in Flat-Bar Stiffened Plates*. *Marine Structures*, 23; 385-404.
- Gannon, L. 2011. *Effect of Welding Residual Stress and Distortion on Ship Hull Structural Performance*. Thesis Doctor of Philosophy, Dalhousie University, Halifax, Nova Scoutia, Canada.
- Jang, G.C., Chang, K.H., Lee, C.H. 2007. *Characteristic of The Residual Stress Distribution in Welded Tubular T-joints*. Journal of Mechanical Science and Technology.

- Linnert, G. E. 1994. *Welding Metallurgy 4th Edition*. Miami: American Welding Society.
- Peric, Mato. et al. 2013. *Numerical Analysis and Experimental Investigation of Welding Residual Stress and Distortions in a T-joint Fillet Weld*. Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, Zagreb, Croatia.
- Rodrigues, Telmo Viana. 2010. *Modelling Post Weld Heat Treatment for Residual Stress Relieving In Welded Steel Plates Using The Finite Element Method*. VI National Congress Of Mechanical Engineering.
- Setyawati, Sri Yuni. 2010. **Analisa Pengaruh Tegangan Sisa dan Distorsi pada Pengelasan Butt Joint dan T-Joint Dengan Variasi Tebal Plat**. Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan, FTK, ITS, Surabaya.
- Syahroni, N. dan M. I. Purbawanto Hidayat. 2012. *3D Finite Element Simulation of T-Joint Fillet Weld: Effect of Various Welding Sequences on the Residual Stress and Distortions*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Utomo, Septian Fajar. 2017 **Analisa pengaruh post Weld Heat Trearment Terhadap Tegangan Sisa dan Distorsi ada Sambungan Tubular Multiplanar Tipe-K dengan Menggunakan Finite Element Method**. Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan, FTK, ITS, Surabaya.
- Wibisono, Baitul O. B. 2017. **Analisa Tegangan Sisa pada Panel Plat dengan Metode Elemen Hingga Menggunakan Jenis Elemen Solid dan Elemen Shell**. Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan, FTK, ITS, Surabaya.
- Wicaksono, Alif Priyo. 2005. **Simulasi Distribusi Panas, Tegangan Sisa dan Distorsi dengan Metode Elemen Hingga**. Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan, FTK, ITS, Surabaya.
- Wiryosumarto, H. dan Toshie Okumura. 1994. **Teknologi Pengelasan Logam**. PT Pradnya Paramita: Jakarta.
- Zacharia, T., Vitek, J.M., Goldak, J.A., Debroy, T.A., Rappaz, M., Bhadeshia, H.K.D.H. 1995. **Modeling The Fundamental Phenomena in Welds” Modeling Simulation Material Science Engineering**. Vol.3.

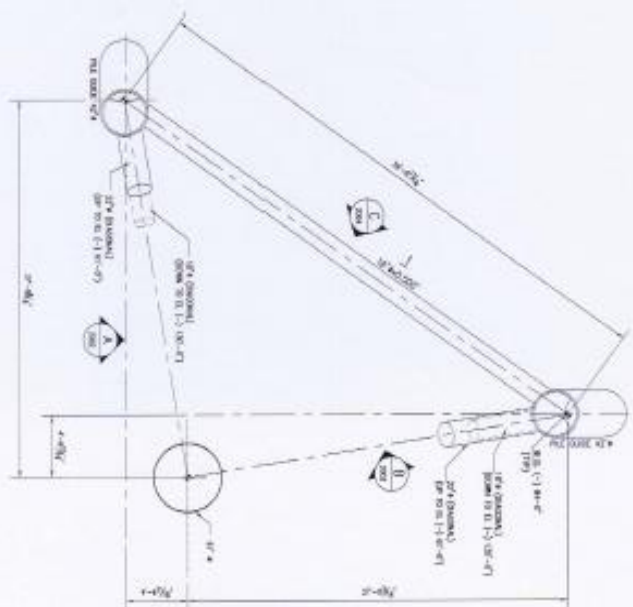
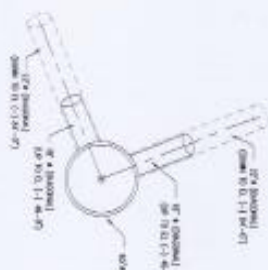
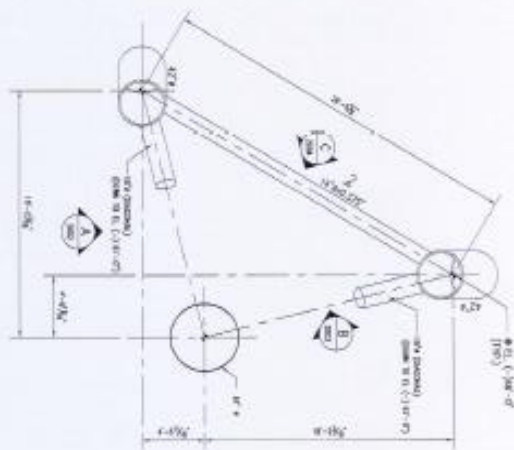
LAMPIRAN A

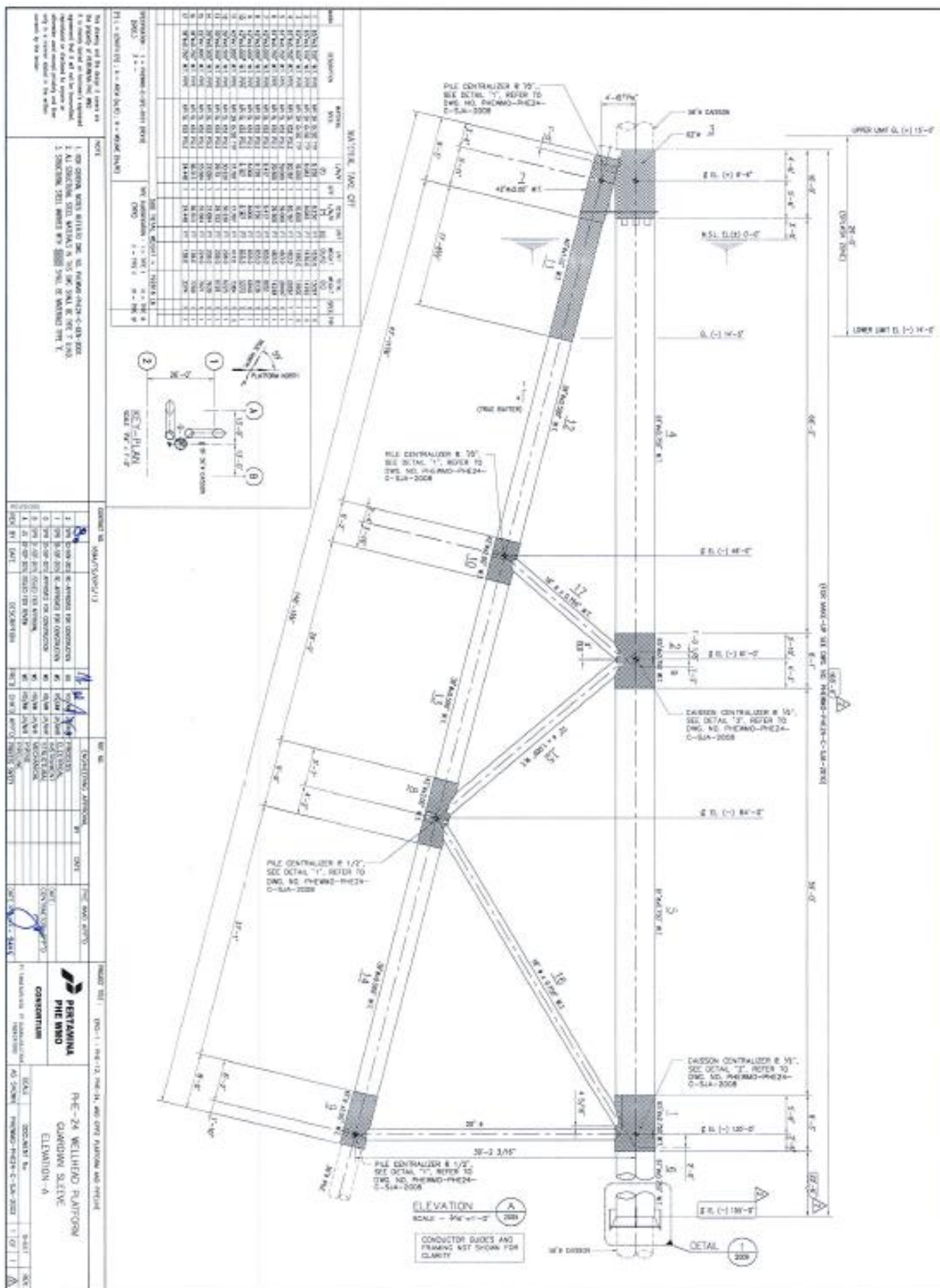
**Data-data yang Digunakan Dalam
Pengerjaan Tugas Akhir**



HORIZONTAL FRAMING PLAN AT EL. (+) 130-0" SCALE: 1/4" = 1'-0"

[illegible][illegible]

[illegible]





PT. GUNUNG SAUTAMA
FABRICATORS

WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (WPS) E31 / WPS / AWS / 15

STANDARD & CODE : AWS D1.1 2015 S&W
CLIENT SPECIFICATION : PHEWMO-S&W-000 Rev-0

DATE DATE
REV PROJECT
CLIENT

September 18, 2015
EPC11-PHE-12,PHE-34, and CCR2 Platform & Pipeline
PHE WMO

SUPPORTING PQR No. : 801 WQTR / 0112
SUPPORTING PQR No. : 801-3 WQTR / 0112
SUPPORTING PQR No. : 801-3 WQTR / 0112

Welding Process (s) : SMAW

Type : MANUAL

JOINT DESIGN USED

Type : Single bevel, Single Vee Inclusion of both welds, and Fillet

Single side welding : ☒ Double side welding : ☐

Backing : Yes ☒ No ☐

Backing material : N/A

Root Opening : 3 - 6 mm Root Face Dimension : 0 - 2 mm

Groove Angle : Single bevel 45° ± 5°, Single Vee 50° ± 5°

T.A.Y minimum 30°

Back Gouging : Yes ☐ No ☒

POSITION

Position of Welding : All Position

Vertical Progression : Up ☒ Down ☐

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Current : AC ☐ DCEP ☒ DCEN ☒ Pulsed ☐

Other :

BASIC METALS

Material Spec. : S 285AP1 2H GR 58 AP1 SL GR X32 K1TM K38

AWS group No. : Group F to Group H, Group I to Group J, Group K to Group L

Thickness (with impact) : 16 mm up to Unlimited for Gr. J to Gr. L

(without impact) : 2mm up to Unlimited mm for Gr. J to L, Gr. I to Gr. K

Diameter (Pilot) : Dia. > 6.625 inch over, All Plate

Targeted Electrode (GTAW)

Size : N/A

Type : N/A

FILLER METAL

SMAW

AWS Specification : A 5.1 : A 5.1

AWS Classification : E 7018-1 : E 7018-1

Trade name : UNICOR (P&G) : UNICOR (P&G)

EN807 WPC

EN807 WPC or Equivalent

SHIELDING

Flux : N/A Gas : N/A

Composition : N/A

Electrode Flux (Class) : N/A Flow Rate : N/A

Gas Cap-Bias : N/A

PREHEAT

Preheat Temp. Min. : Tsk > 2 mm - 30 mm : ambient air

Tsk > 20mm - 30 mm : 85 °C

Tsk > 30 mm - 65 mm : 150 °C

Interpass Temp. Min. : same as preheat temp. Max. : 200 °C

Method of Preheat : Gas Burner Method of measurement : Digital Thermometer/Temp. Stick

TECHNIQUE

The test capping pass shall be at the middle of capping

Stringer or Weave Bead : STRING & WEAVER max. 2.5 x Dia. Electrode

Weld pass or Single pass (per side) : MULTIPASS

Number of Electrode : Single Longitudinal

Angular

Angle

Contact Tube to Work Distance : N/A

Peening : NONE

Interpass Cleaning : GRINDING AND / OR BRUSHING

POSTWELD HEAT TREATMENT

Temperature : N/A

Time :

WELDING PROCEDURE

Weld joint	Process	Filler Metal		Current			Travel Speed (mm/min)	Position	Heat Input (kJ/mm)
		Class	Size (mm)	Type & Polarity	Amps or Wire Feed Speed	Volts			
1 (Root)	SMAW	E 7018-1	3.2	DCEN	102 - 125	23 - 25	45 - 93	All	1.95 - 4.28
2 (Filler Pass)	SMAW	E 7018-1	3.2	DCSP	124 - 131	23 - 27	65 - 82	All	1.99 - 5.28
Fill	SMAW	E 7018-1	4.0	DCSP	120 - 164	23 - 28	71 - 100	All	1.95 - 3.88
Cap	SMAW	E 7018-1	3.2	DCSP	122 - 143	24 - 27	75 - 153	All	1.15 - 3.89

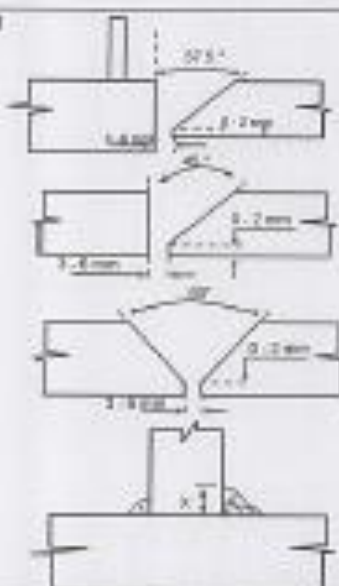
Back weld if needed, Deep of Arc Air Gouging 3-4 mm & follow by smooth grinding. Welding Residual After NDE (PT/NPD) accepted

Fill	SMAW	E 7018-1	3.2	DCSP	124 - 131	23 - 27	65 - 82	All	1.99 - 3.36
Cap	SMAW	E 7018-1	3.2	DCSP	122 - 143	24 - 27	75 - 153	All	1.15 - 3.89

For Fillet Weld

1/4"	SMAW	E 7018-1	3.2	DCSP	102 - 143	22 - 25	65 - 153	1F, 2F, 3F, 4F	0.88 - 3.30
------	------	----------	-----	------	-----------	---------	----------	----------------	-------------

Joint Detail



PREPARED BY	CHECKED BY	APPROVED BY PHE WMO	REVIEWED & APPROVED BY CERTIFYING
SIGN :	SIGN :	SIGN :	SIGN :
NAME : And Yula Anggara	NAME : Khusnawati	NAME : TAUFIK B. S.	NAME : Khusnawati
DATE : September 18, 2015	DATE : September 18, 2015	DATE : 18-SEP-2015	DATE : 18-SEP-2015



REVISION : 01
DATE : 12/08/2015

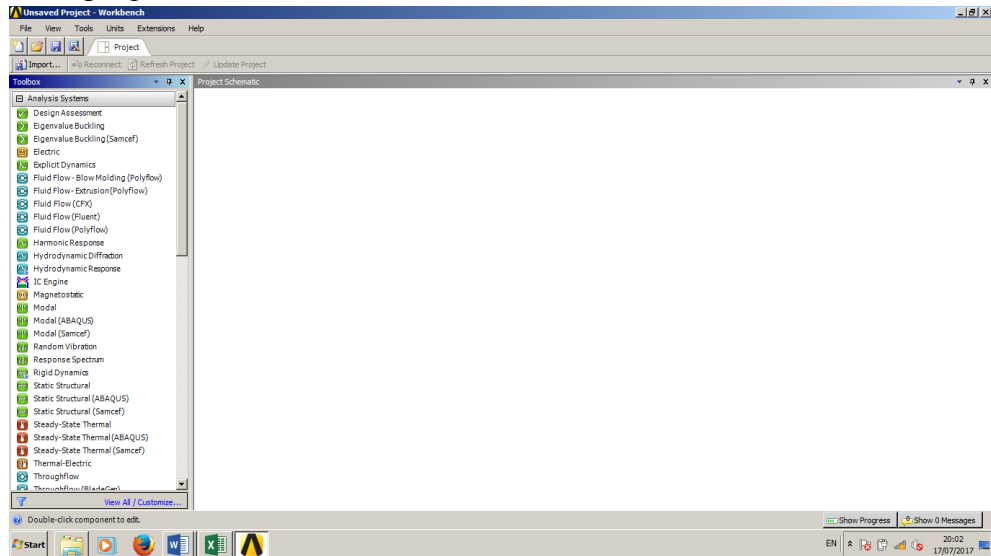
LAMPIRAN B

Proses Pengerjaan Analisa Thermal Dengan *Software* Ansys Workbench 16.2 (Transient Thermal)

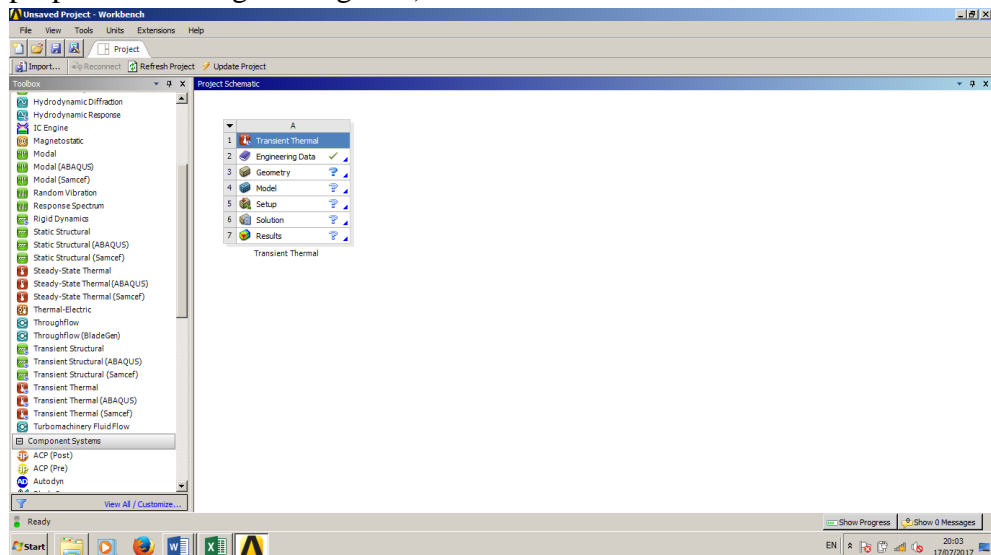
LAMPIRAN B

PROSES Pengerjaan Analisa Thermal

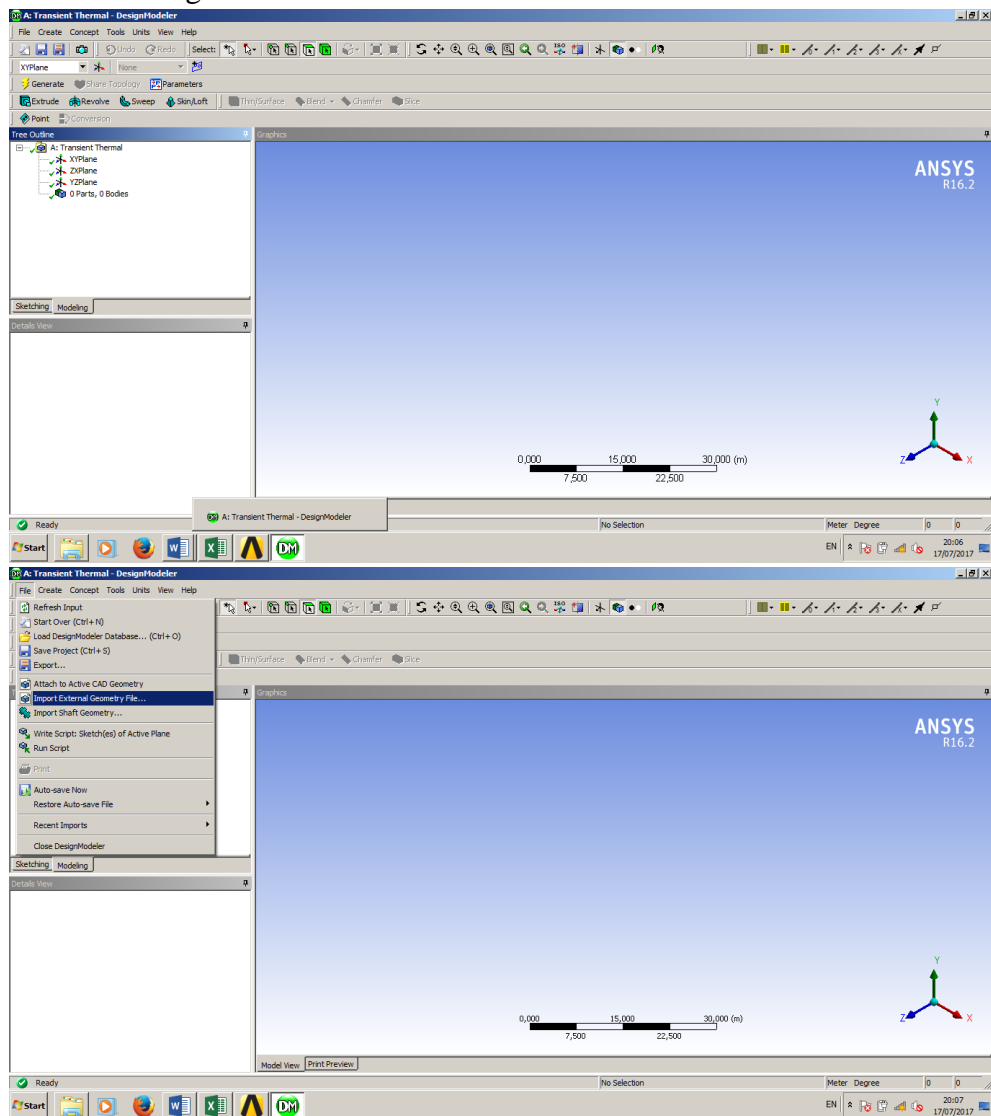
1. Buka program ANSYS WORKBENCH 16.2

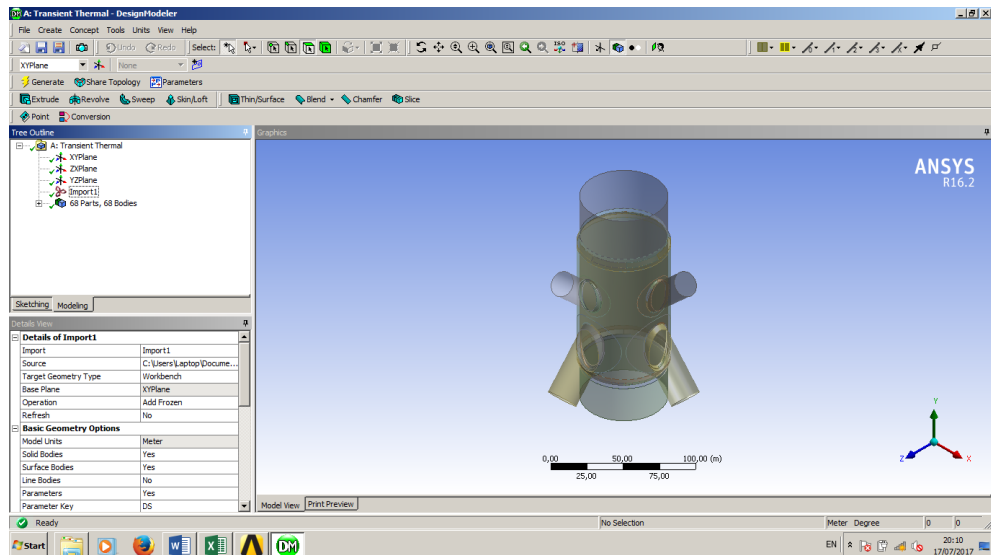


2. Double click pada Transient thermal (Jika ingin mengganti material propertis buka engineering data)

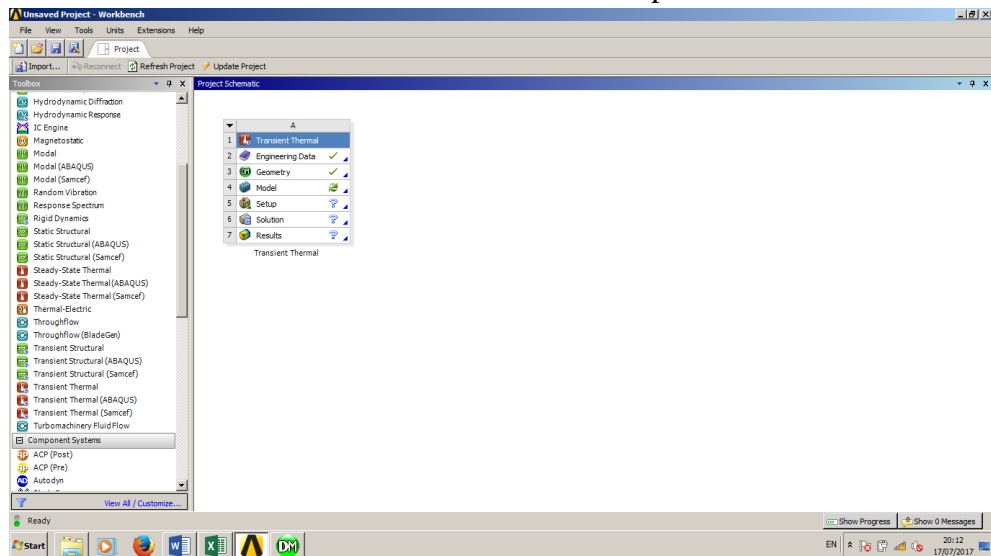


3. Buka Geomety pada Project Schematic → import external geometry file
→ Lalu click generate

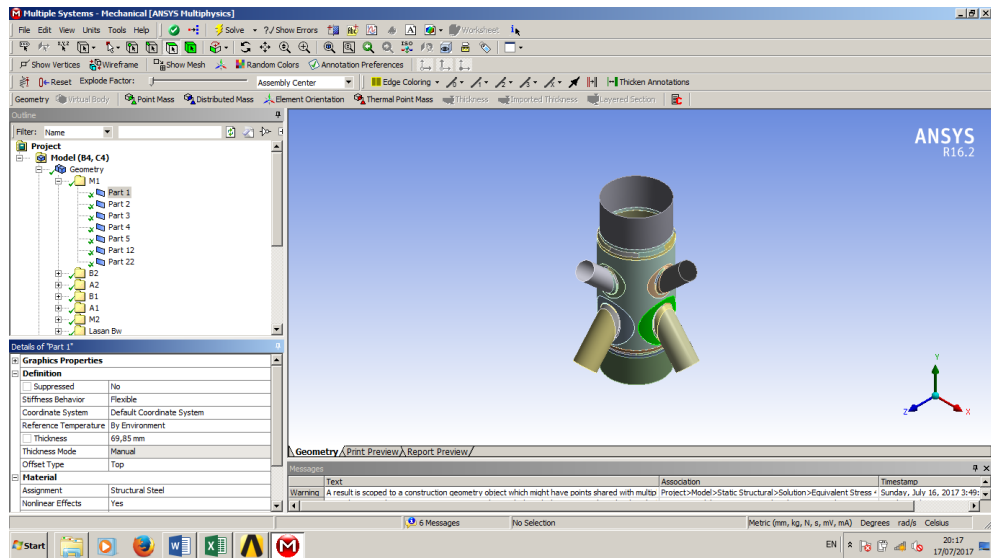




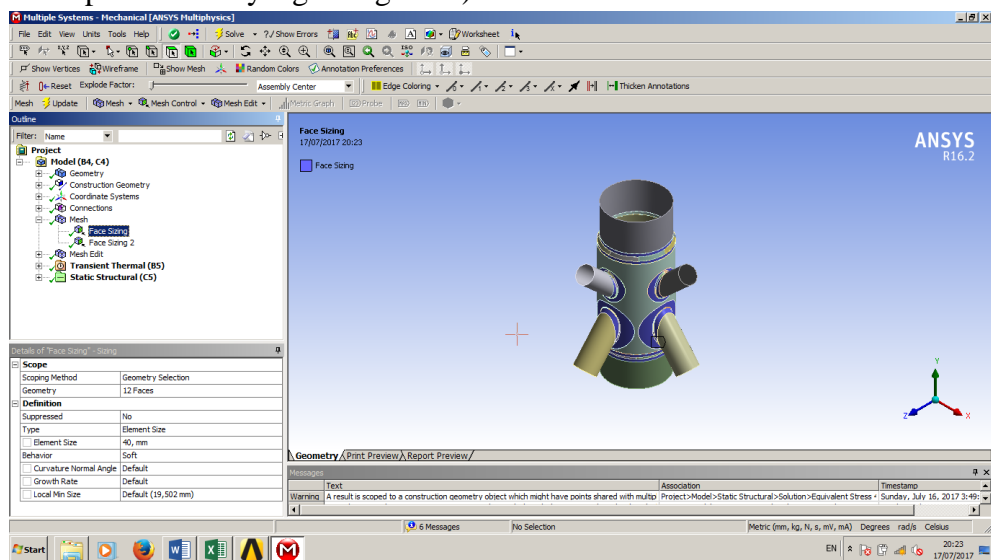
4. Setelah selesai degenerate, kembali pada jendela utama ANSYS WORKBENCH 16.2. Akan muncul tanda refresh pada Model



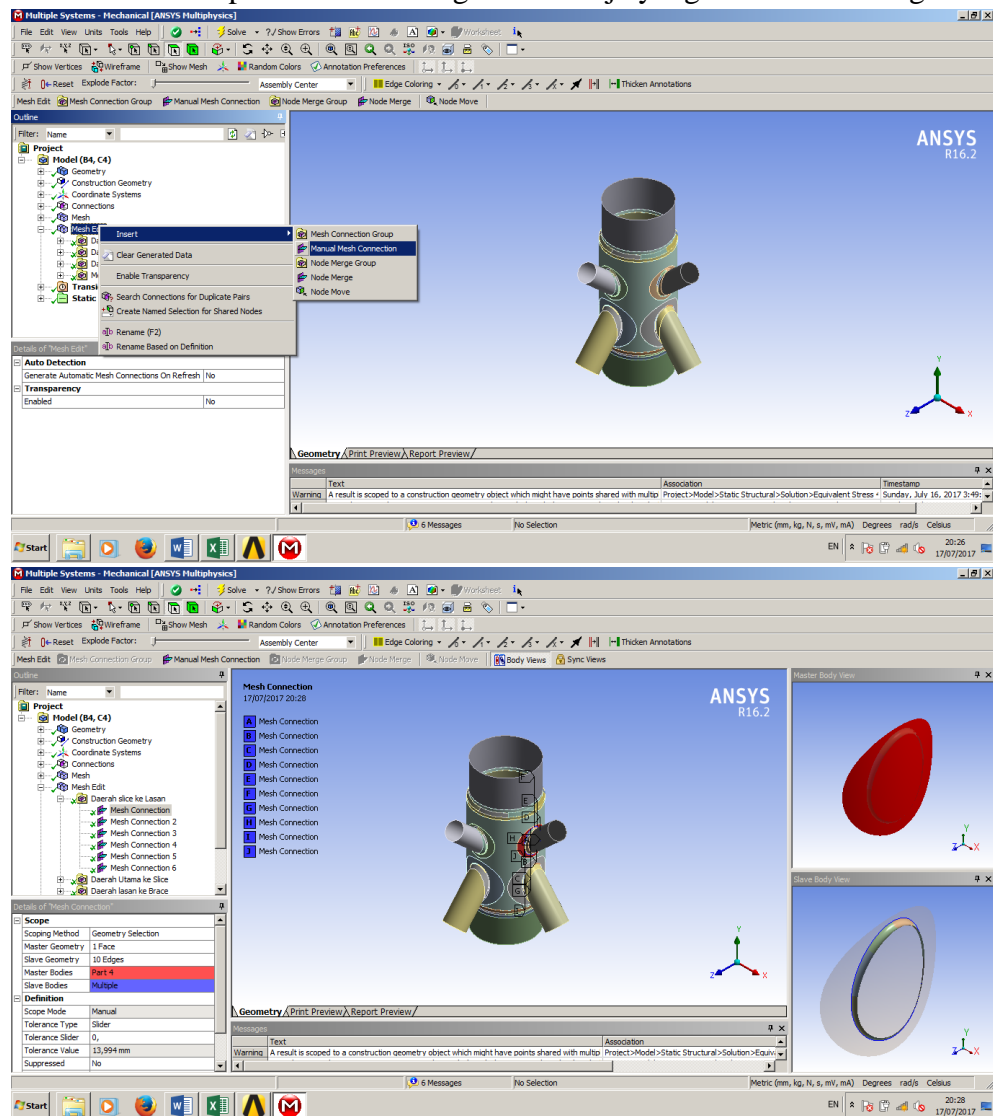
5. Click Model → lalu masuk pada Geometri dalam Multiple systems → Masukkan ketebalan pada Definition setiap Part



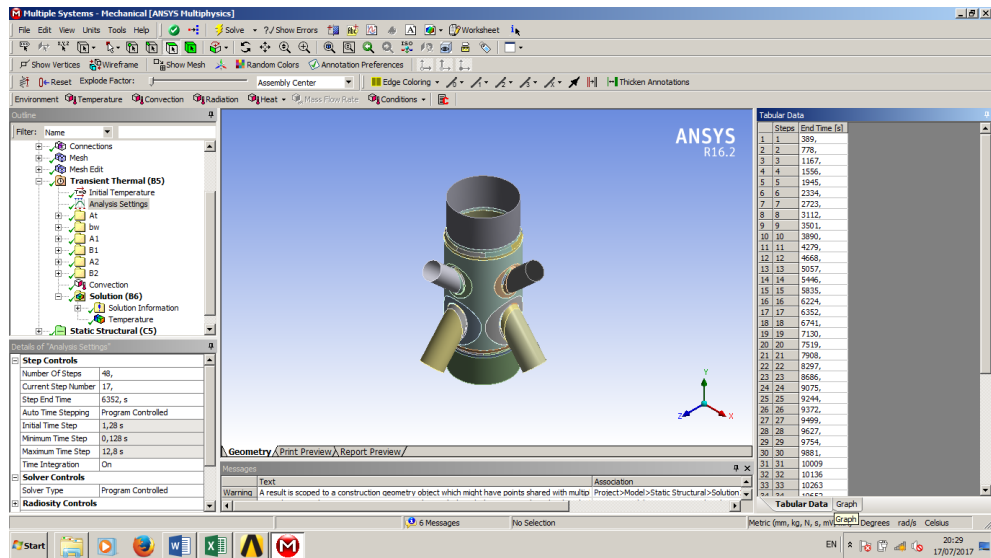
6. Click kanan pada mesh → lalu click Sizing (untuk menentukan besaran mesh pada daerah yang di inginkan)



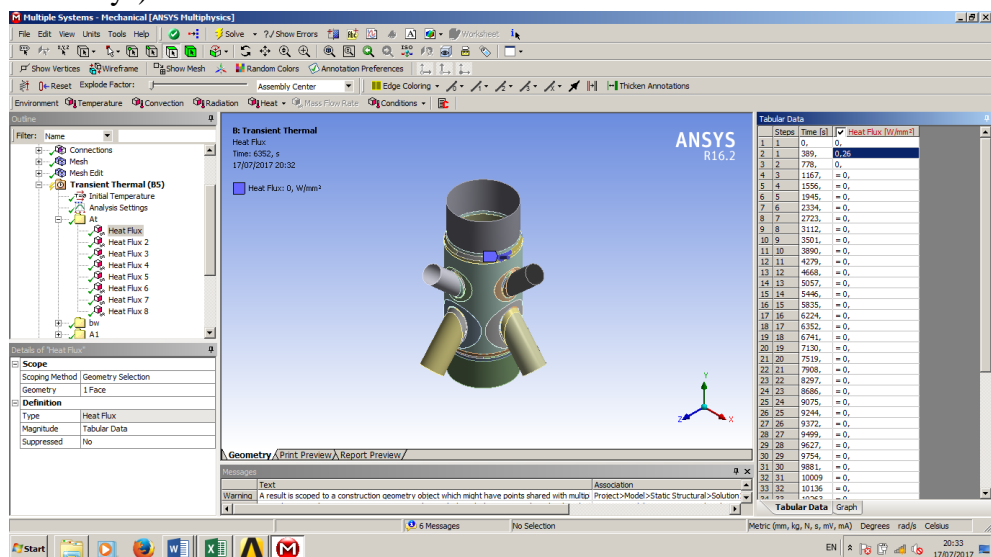
7. Jika meshing pada setiap part belum tersambung maka dilakukan “Mesh edit”. Click kanan pada Mesh → pilih mesh edit → Manual Mesh connections lalu pilih Face dan Edges mana saja yang akan di sambung.

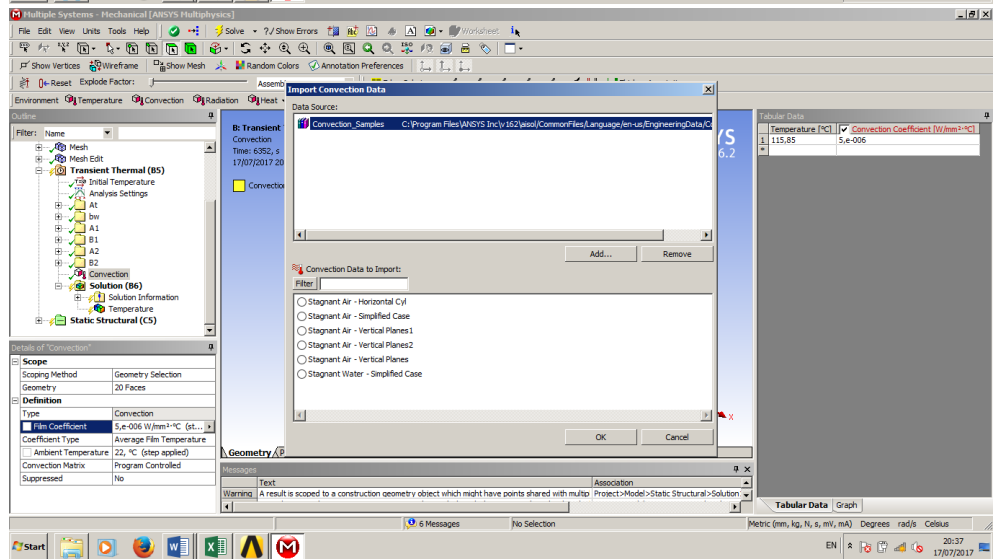
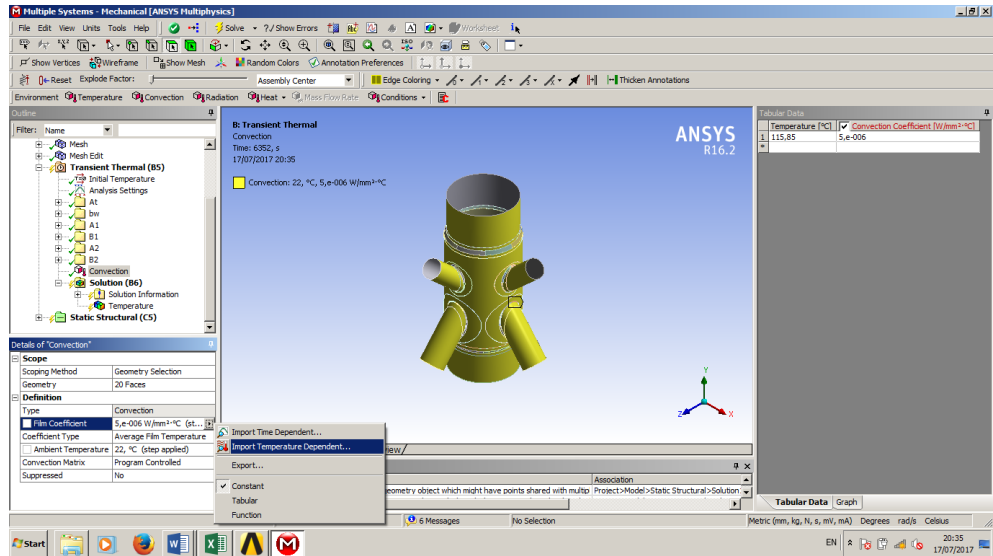


8. Lalu pada Transient Thermal pilih Analysis Settings → masukkan Step dan waktu yang dibutuhkan untuk setiap Step

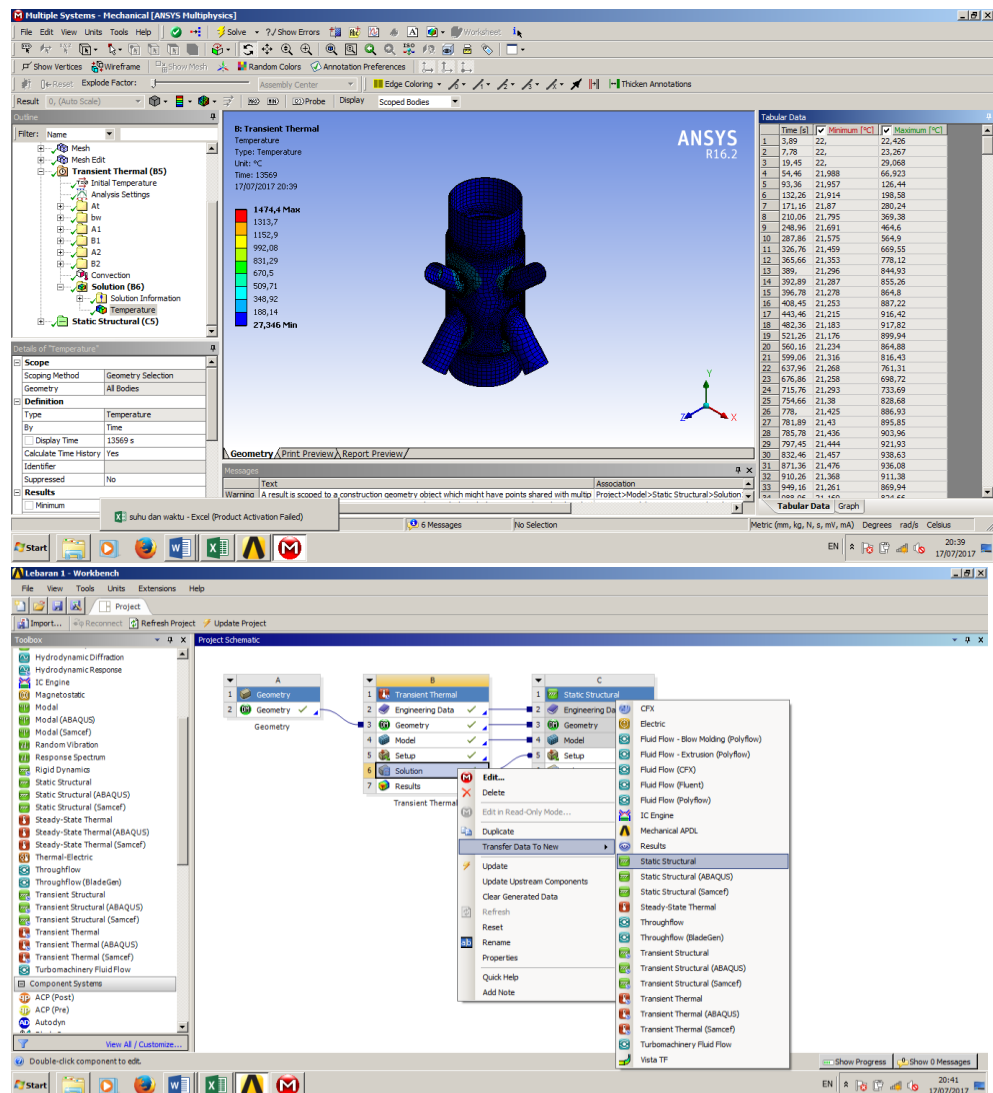


- Setelah Step-Step sudah dimasukkan lalu masukkan beban heat flux untuk setiap load step. Dan masukkan Convection dengan pemilihan geometry selain daerah pengelasan. (Convection dilakukan dengan mengimport data dari ansys) → setelah semua dilakukan kemudian click Solve





10. Setelah hasil running keluar maka akan didapatkan suhu maksimum di setiap daerah pengelasan dari tubular data. Lalu transfer solution kedalam static structural.



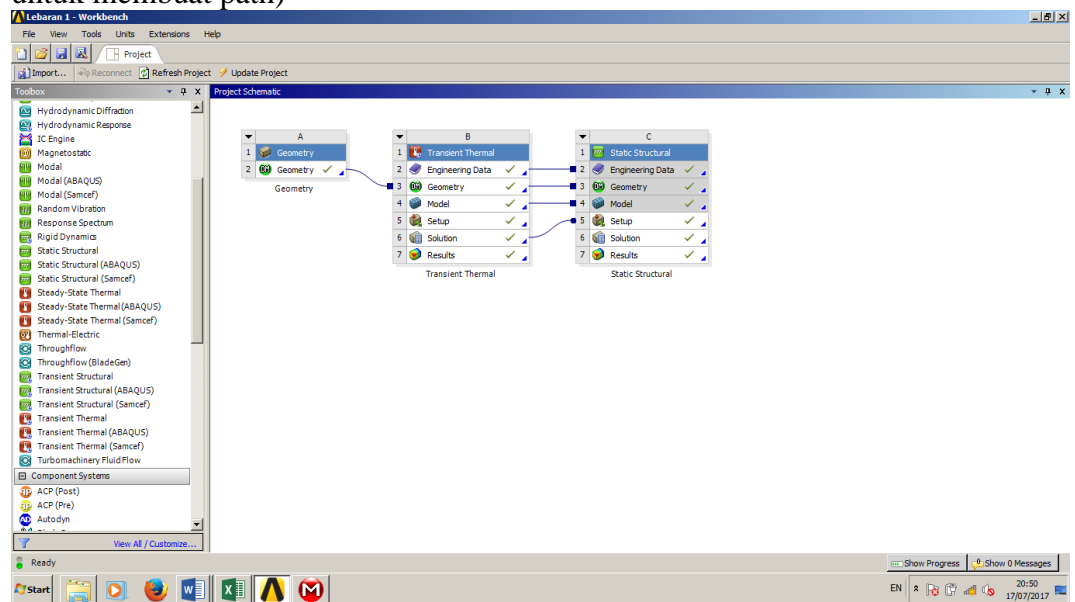
LAMPIRAN C

Proses Pengerjaan Analisa Struktural Dengan *Software* Ansys Workbench 16.2 (Static Struktural)

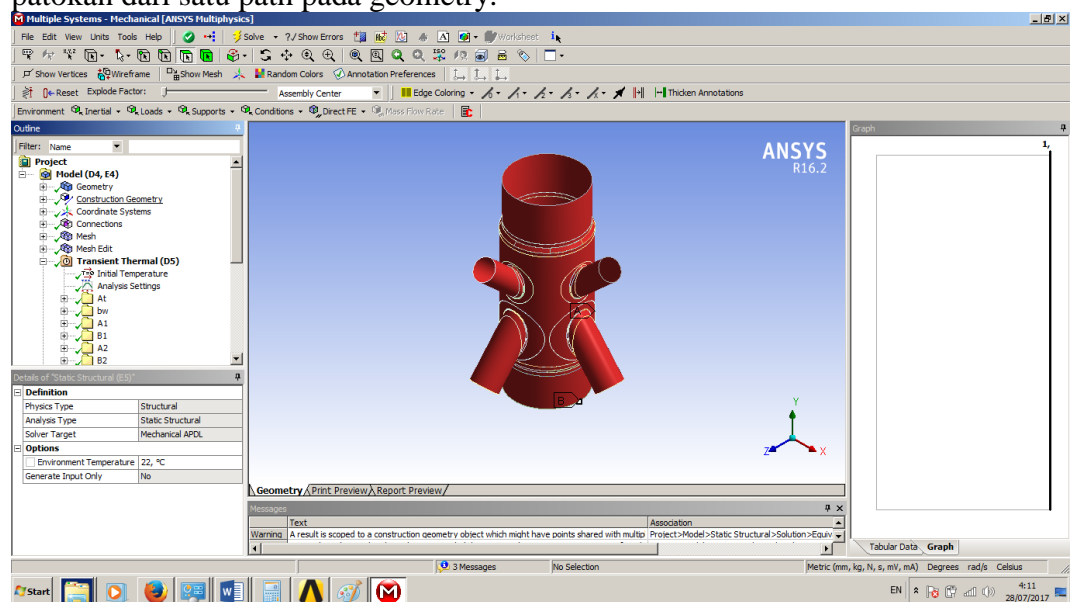
LAMPIRAN C

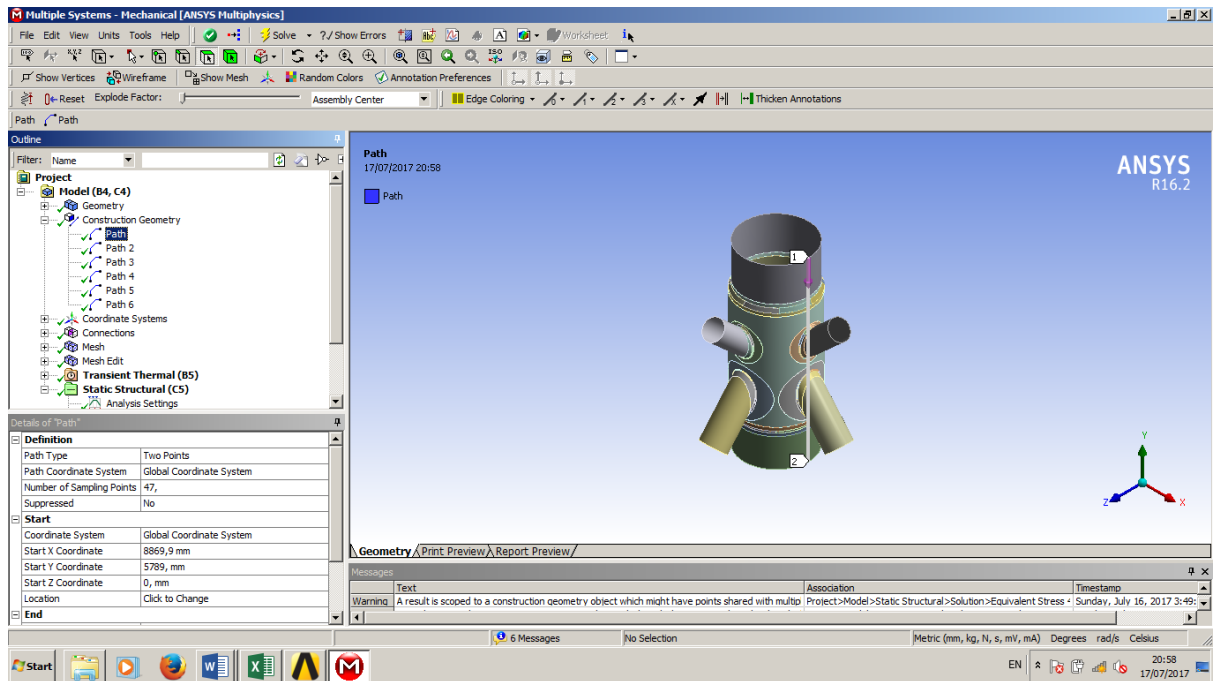
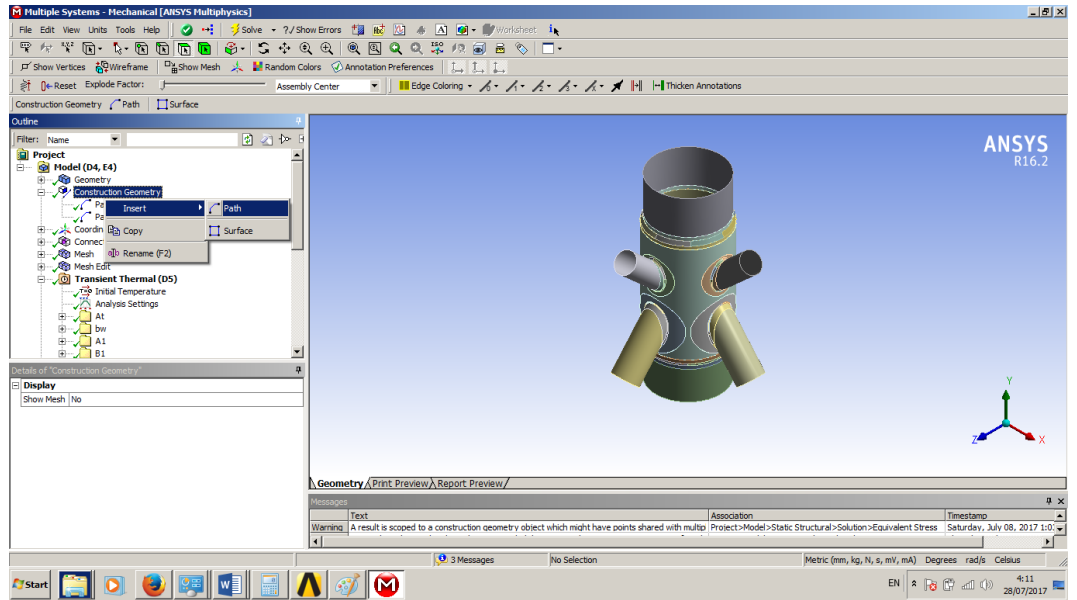
PROSES MENGUBAH BEBAN THERMAL MENJADI REGANGAN STRUKTURAL YANG MENAKIBATKAN TERJADINYA TEGANGAN SISA

1. Pada jendela utama ANSYS WORKBENCH 16.2.pilih setup pada static structural. Lalu pada geometri click kanan → pilihConstruction geometri (untuk membuat path)

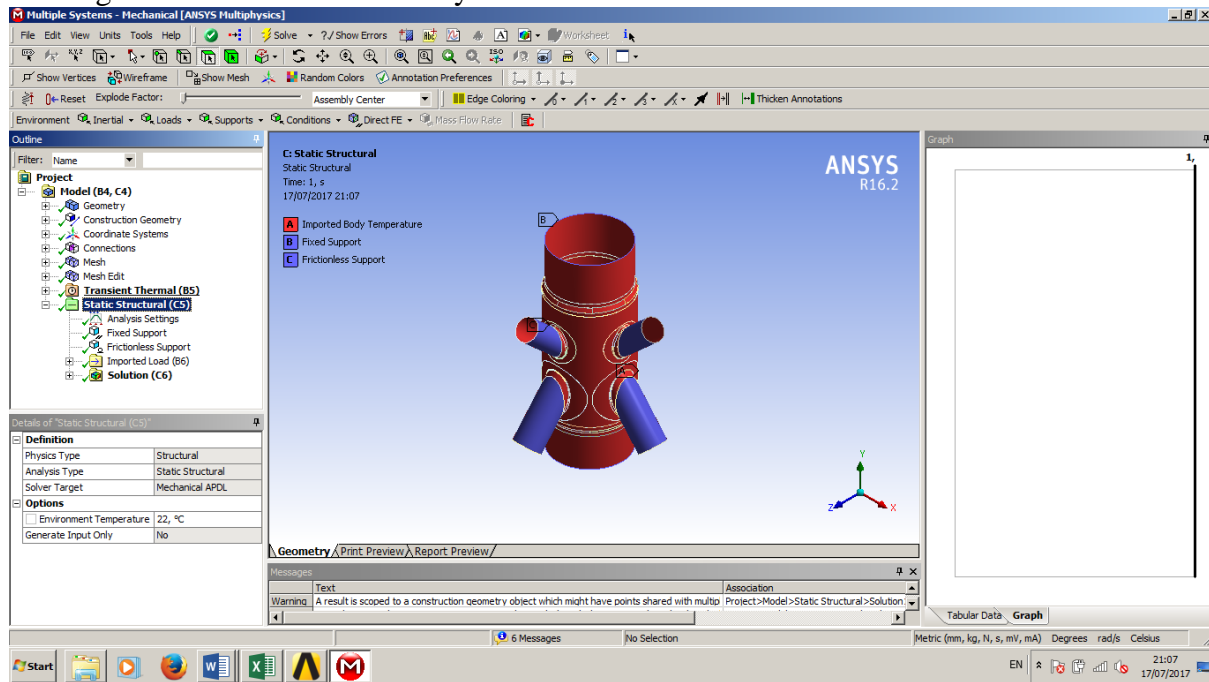


2. Pada Construction geometri pilih path → pilih 2 (dua) titik sebagai patokan dari satu path pada geometry.

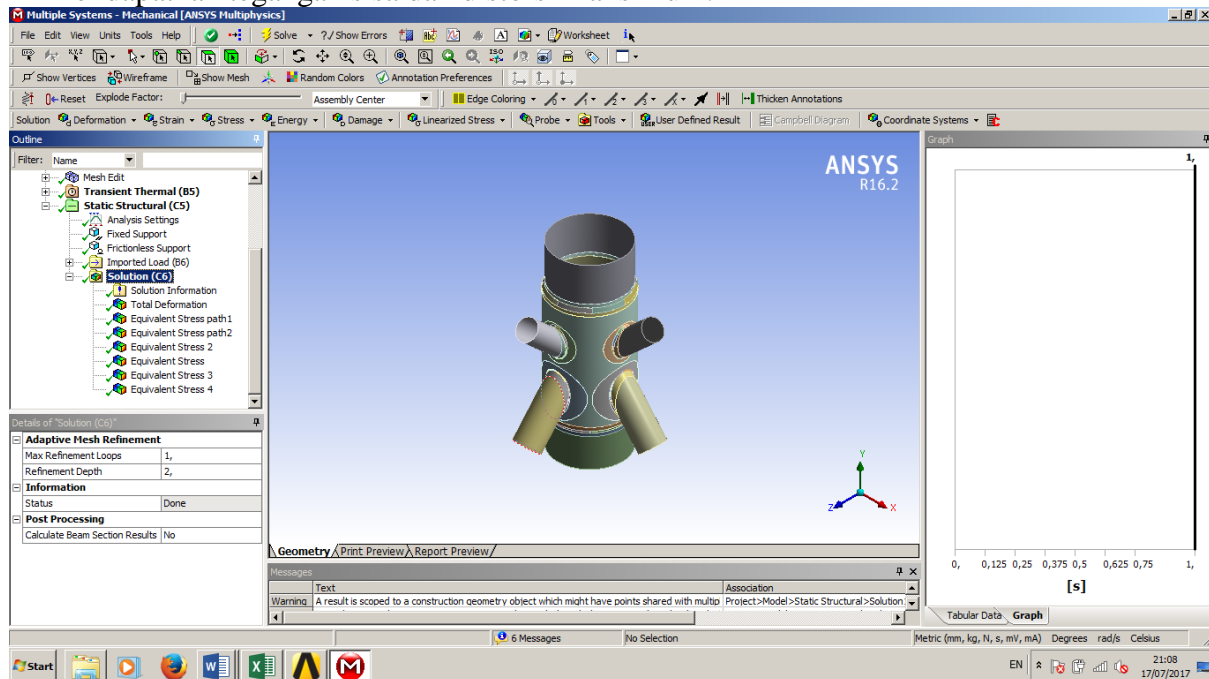


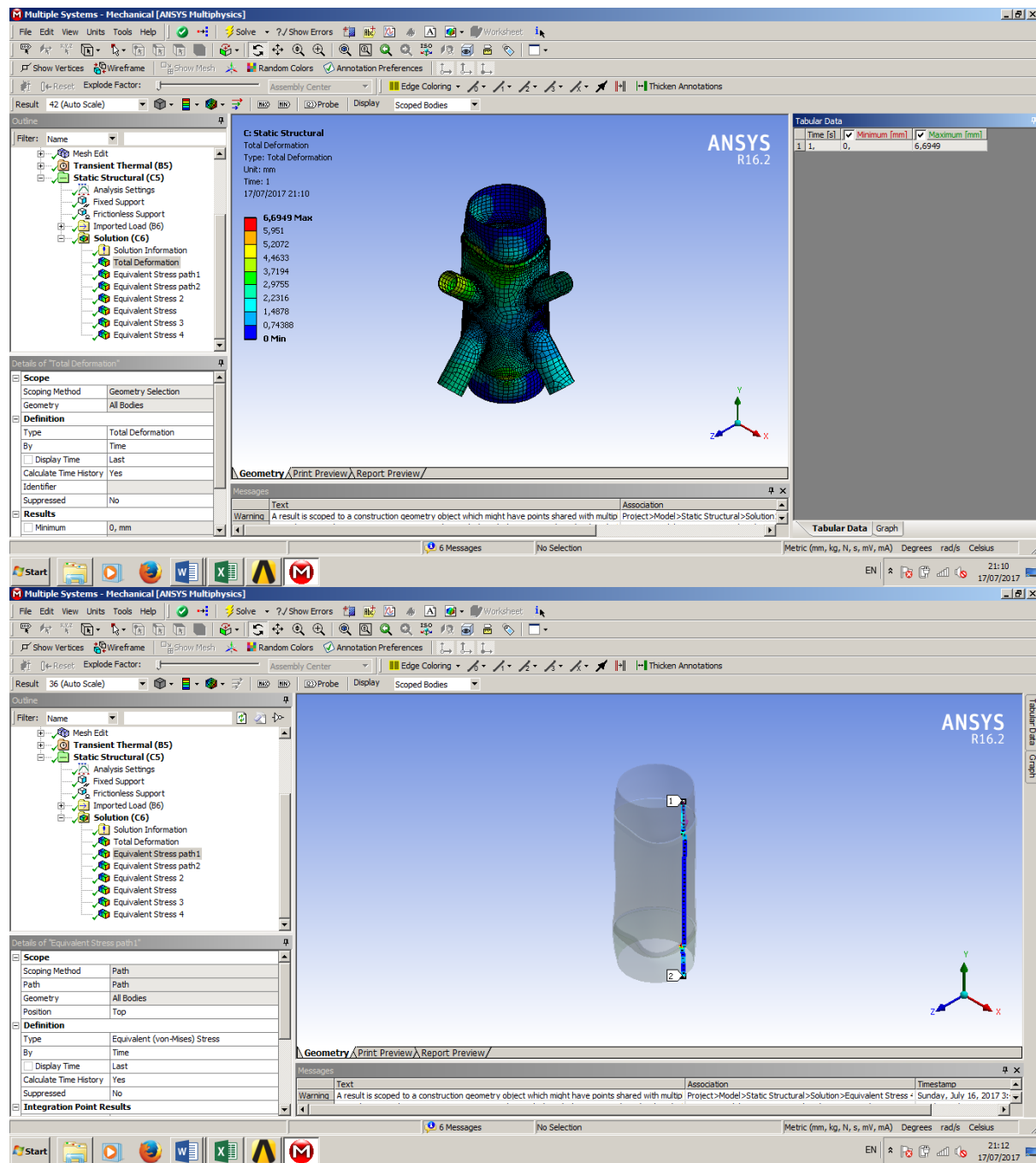


3. Pada static Struktural pilih support untuk boundary conditionnya sesuai dengan kondisi model sebenarnya.



4. Lalu pada Solution pilih total deformation dan equivalent stress untuk mendapatkan tegangan sisa dan distorsi maksimum.





5. Setelah itu dari hasil-hasil yang sudah didapat dimasukkan dalam laporan.

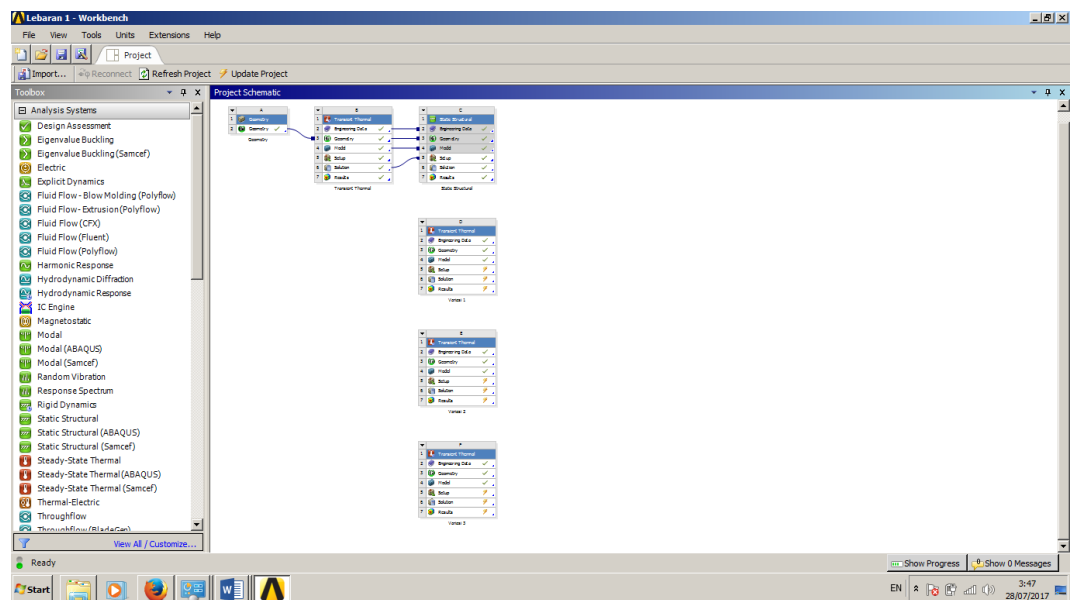
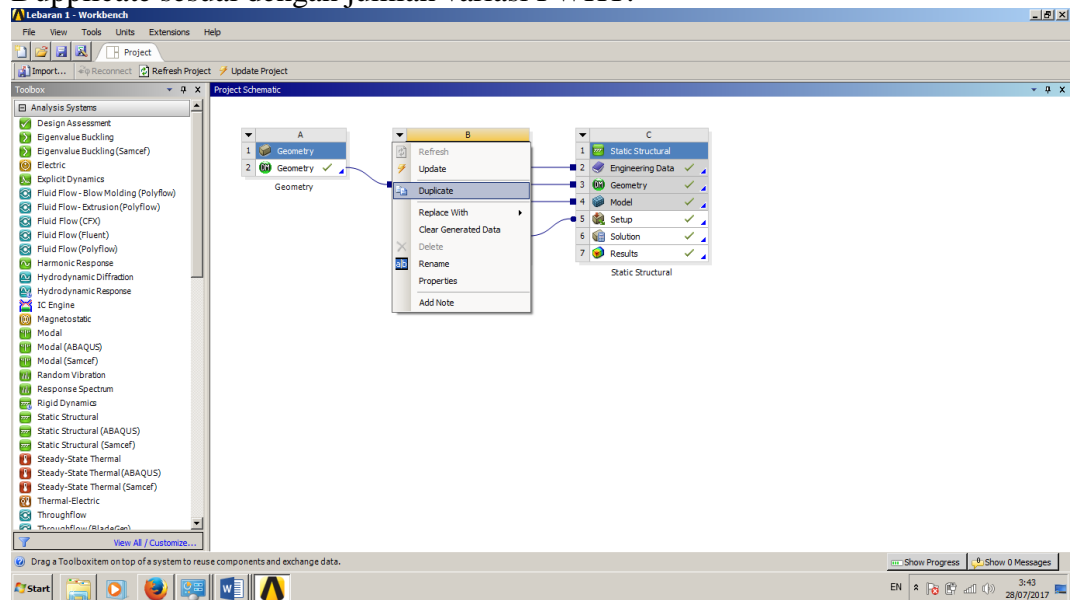
LAMPIRAN D

Proses Pengerjaan *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) Dengan *Software* Ansys Workbench 16.2 (Transient Thermal & Static Struktural)

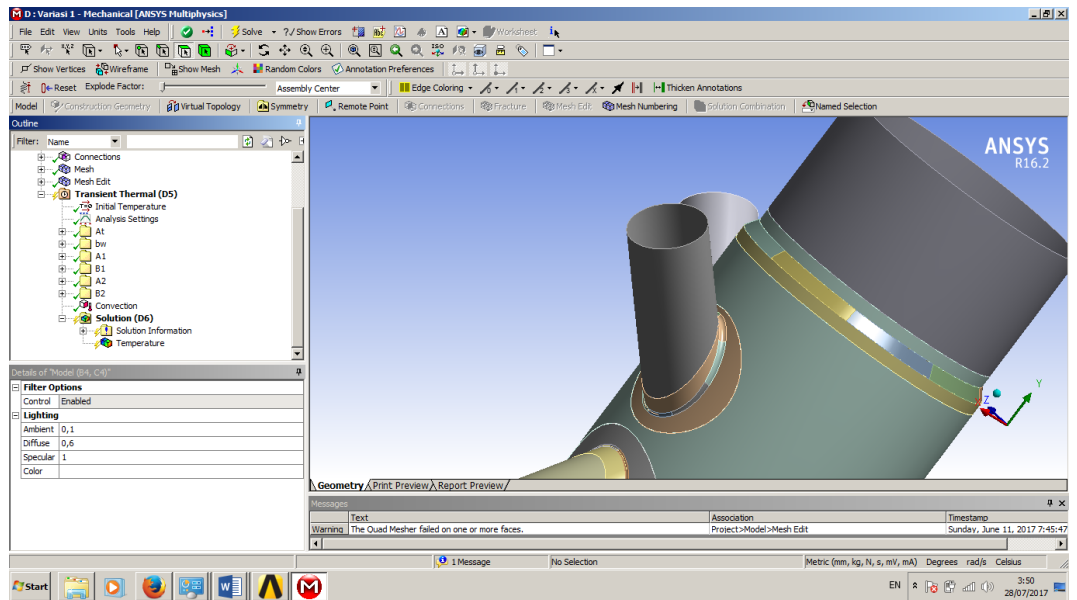
LAMPIRAN D

PROSES *POST WELD HEAT TREATMENT* (PWHT) YANG DAPAT MENGURANGI TEGANGAN SISA PADA STRUKTUR

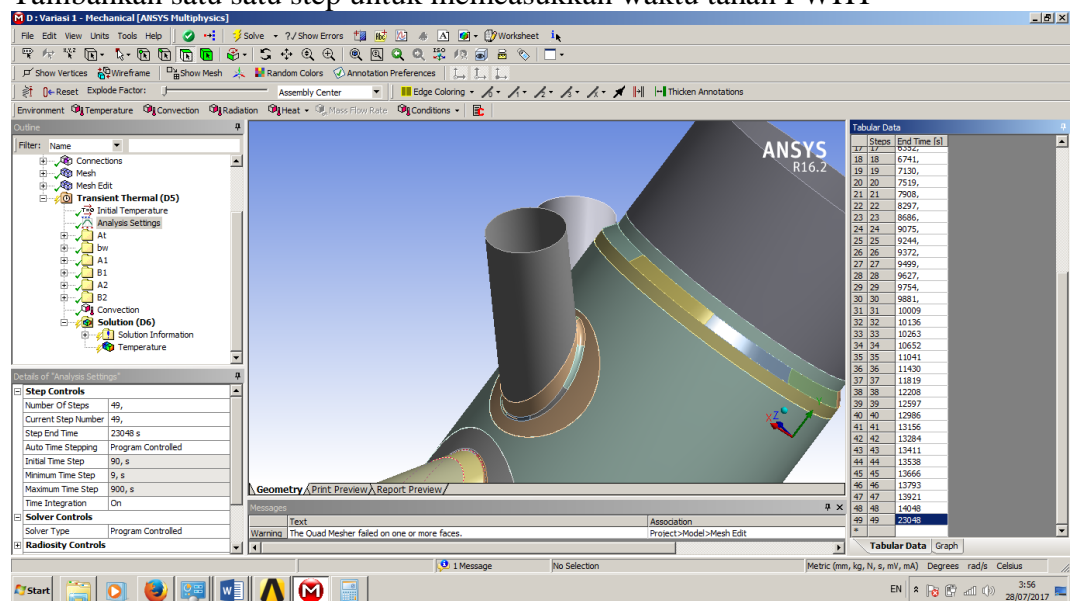
1. Pada jendela utama ANSYS WORKBENCH 16.2. pilih duplicate pada *transient thermal* untuk menggandakan pekerjaan sebelum PWHT → Duplicate sesuai dengan jumlah variasi PWHT.



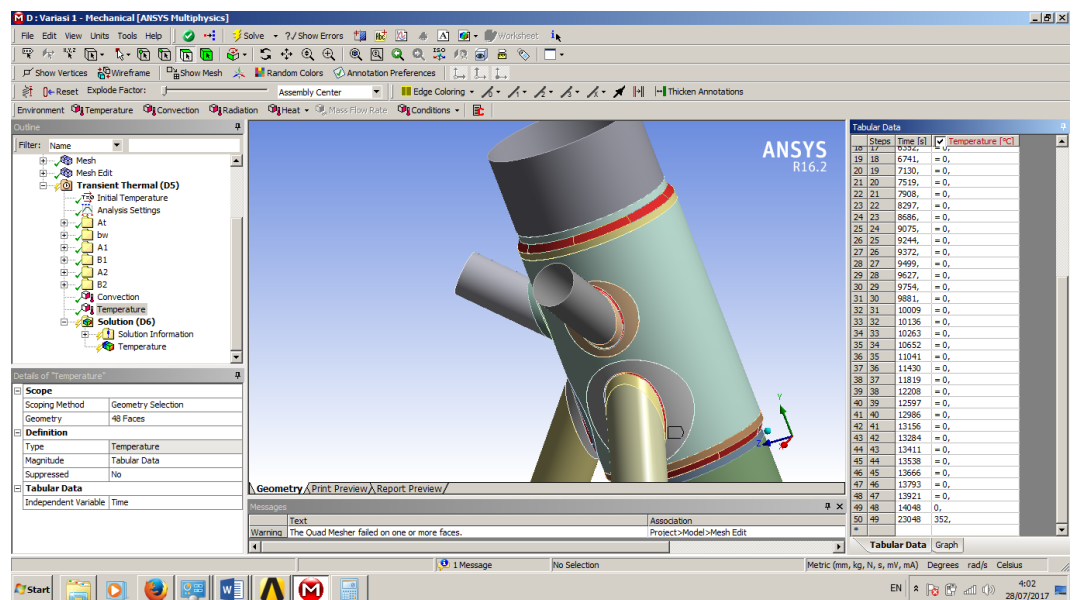
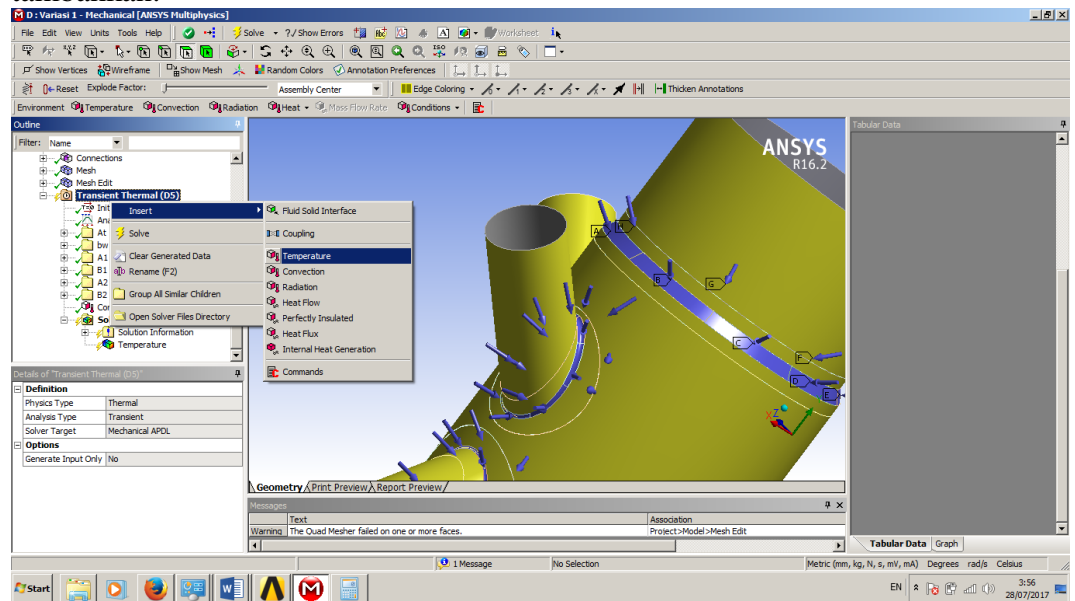
2. Setelah digandakan click pada variasi pertama untuk memulai simulasi PWHT dalam ansys → Karena hasil dari duplicate sehingga tidak perlu lagi memasukkan heat flux, step, dan waktu.



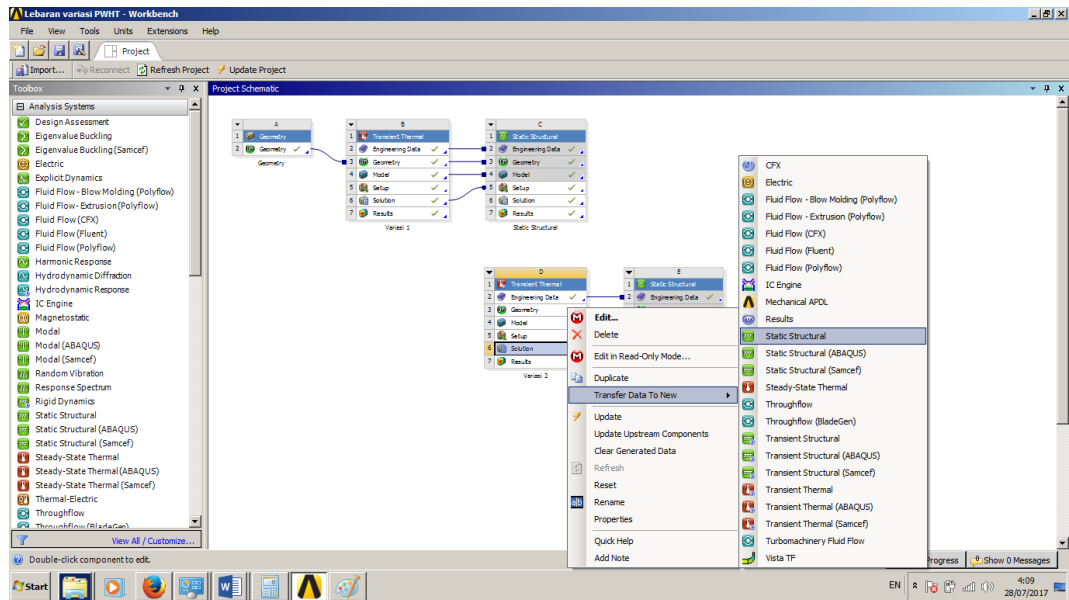
3. Tambahkan satu satu step untuk memasukkan waktu tahan PWHT



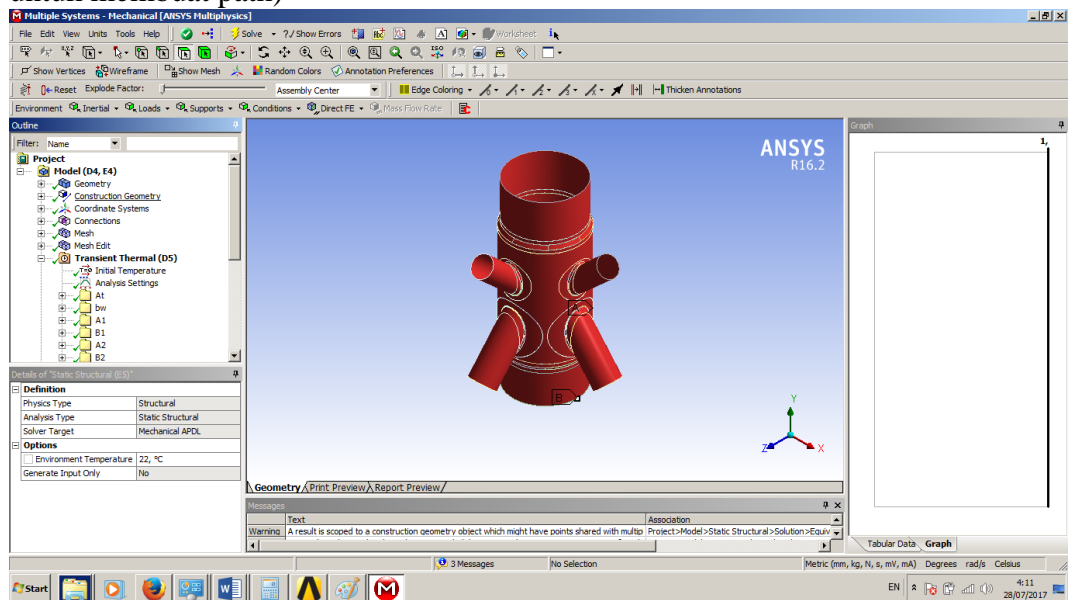
4. Masukkan themperatur dengan geometry pada area pengelasan dan dengan suhu sesuai dengan variasi yang sudah di tentukan → lalu masukkan suhu PWHT pada step paling terakhir yang baru saja di tambahkan.

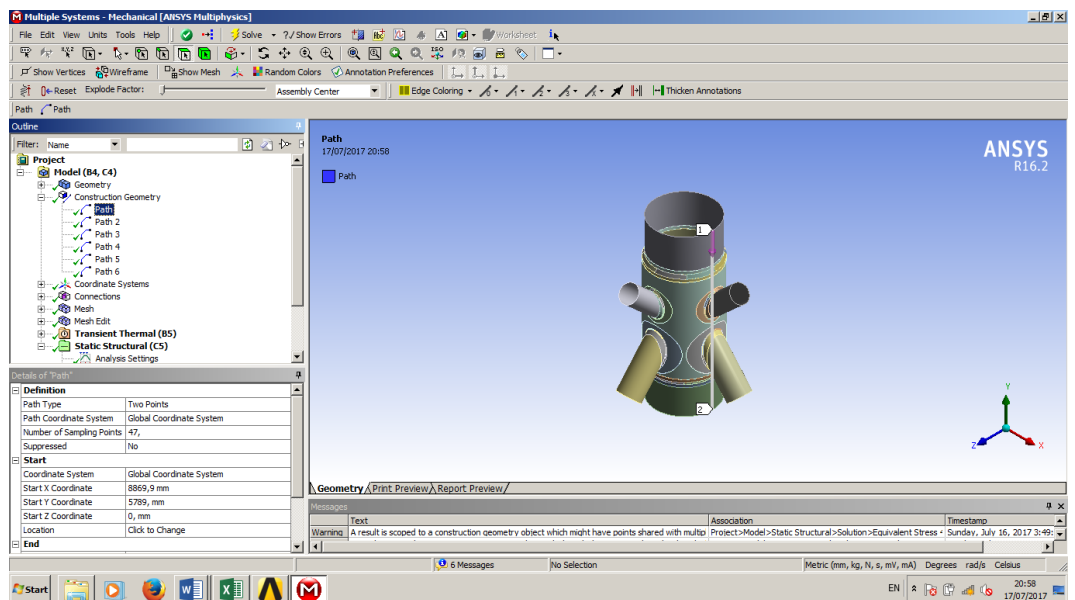
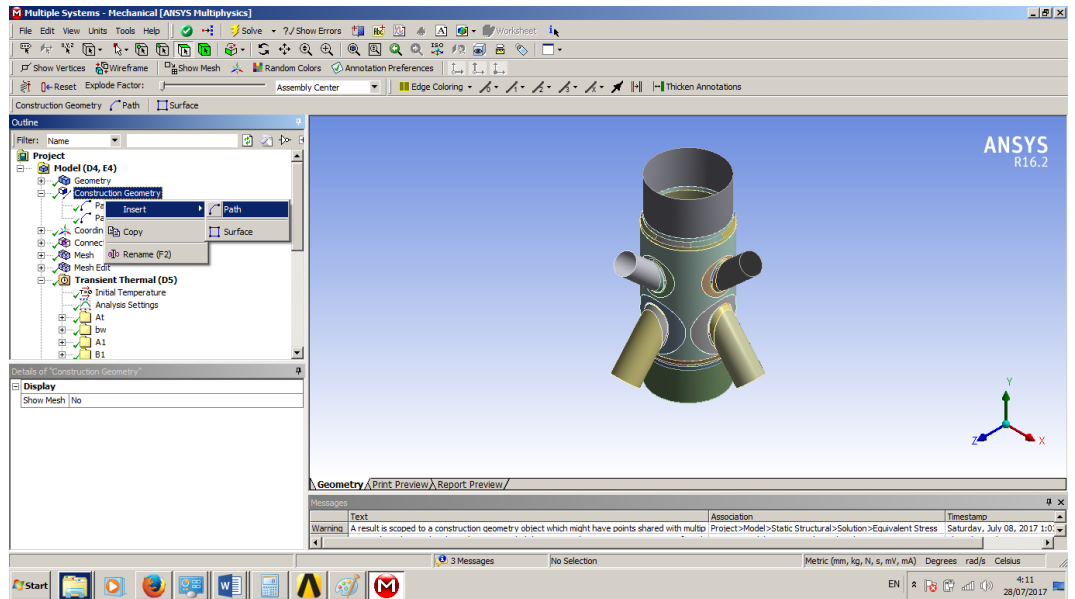


5. Lakukan solve untuk mendapatkan beban themperature setelah melakukan PWHT pada satu variasi.
6. Setelah sudah selesai menganalisa beban thermal yang terjadi pada struktur seperti yang dilakukan sebelumnya untuk mencari tegangan sisa dalam Ansys Static Struktural → maka dilakukan transfer data to static structural pada semua variasi.

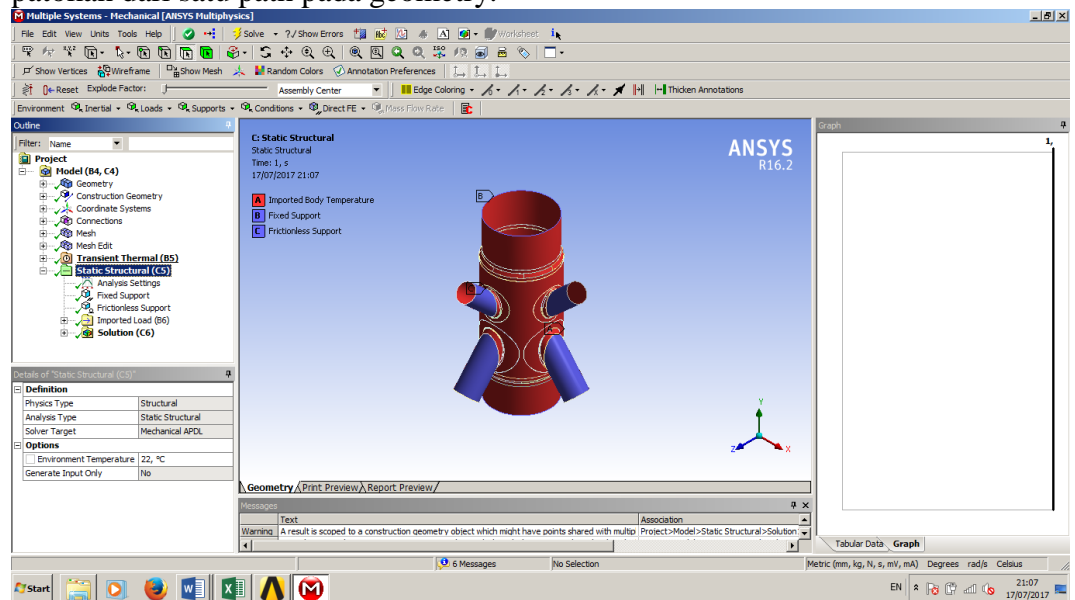


7. Pada jendela utama ANSYS WORKBENCH 16.2. pilih setup pada static structural. Lalu pada geometri click kanan → pilih Construction geometri (untuk membuat path)

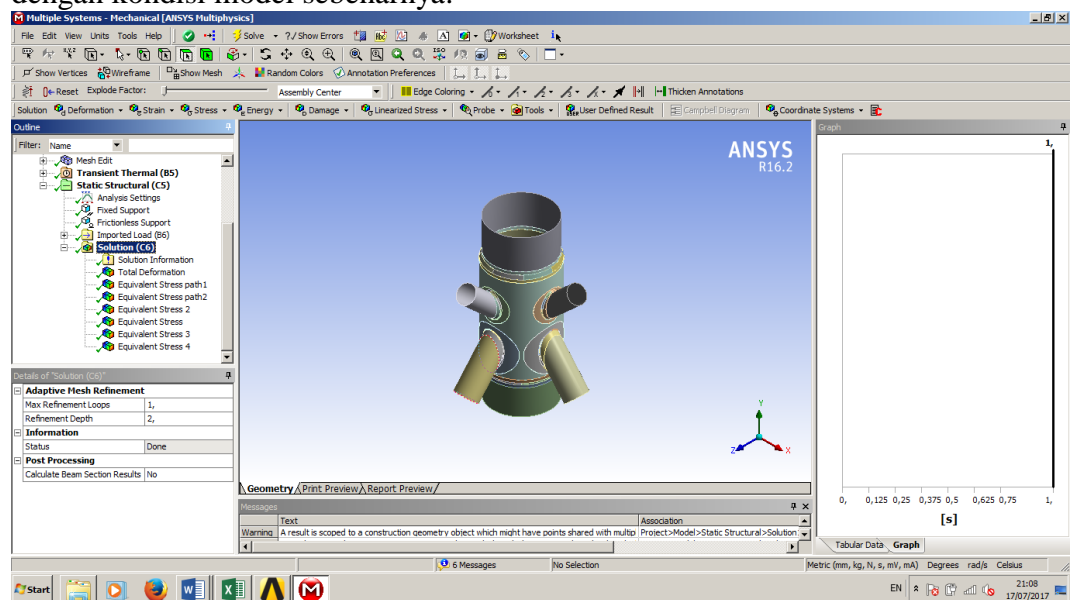




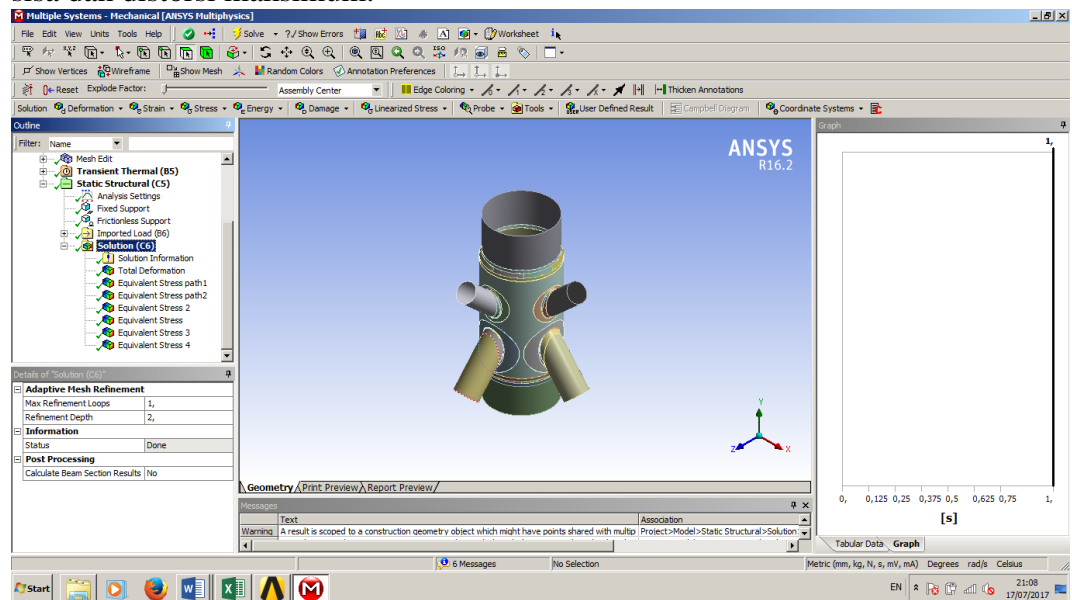
8. Pada Construction geometri pilih path → pilih 2 (dua) titik sebagai patokan dari satu path pada geometry.



9. Pada static Struktural pilih support untuk boundary conditionnya sesuai dengan kondisi model sebenarnya.



10. Lalu pada Solution pilih equivalent stress untuk mendapatkan tegangan sisa dan distorsi maksimum.



11. Setelah itu dari hasil-hasil yang sudah didapat dimasukkan dalam laporan.

